



UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID
FACULTAD DE BELLAS ARTES
MÁSTER UNIVERSITARIO EN CONSERVACIÓN
DEL PATRIMONIO CULTURAL

Trabajo Fin de Máster

**Contaminantes Atmosféricos en
Museos:**
Centro de Arte Complutense c arte c

Alumna: Isabel Sousa García

Tutora: Sonia Santos Gómez

Septiembre de 2017



Trabajo Fin de Máster

Contaminantes Atmosféricos en Museos: Centro de Arte Complutense c arte c

Alumna: Isabel Sousa García

Tutora: Sonia Santos Gómez

Agradecimientos

Al Centro c arte c por hacer posible la realización de este trabajo. A mi tutora Sonia Santos Gómez por su gran ayuda e implicación y a todos los demás profesores, familiares y amigos que me han apoyado en la realización de este Trabajo Fin de Máster.

Resumen:

La conservación preventiva en museos incluye el control de diversos factores de deterioro entre los que se encuentran la humedad relativa y temperatura incorrectas, la iluminación, fuerzas físicas, el agua o el fuego, las plagas, robos y vandalismo o la disociación, además de la contaminación atmosférica. Este último constituye uno de los factores de deterioro que últimamente focaliza mayor atención por parte de los investigadores. En la actualidad, se conocen mejor cuales son los contaminantes que deterioran el patrimonio gracias a los actuales sistemas de medición y, además se conocen sus efectos negativos sobre las personas, el medio ambiente y también sobre el patrimonio cultural. Queda aún, sin embargo, mucho por investigar sobre este tema y cómo afecta a las colecciones situadas en interior de museos. Por ello, el presente proyecto ha tenido como objetivo fundamental el estudio de ciertos contaminantes atmosféricos (NO_2 , SO_2 , O_3 , HCHO y CH_3COOH) en un contexto espacial concreto, el Centro de Arte Complutense, con el objetivo de conocer, a través de muestreos mediante un sistema de captación pasiva, si existe riesgo sobre las obras que son y serán expuestas debido a este factor de deterioro. Como resultado de este estudio, se ha detectado la presencia de altas concentraciones de algunos de los contaminantes muestreados, y por tanto, se considera la necesidad de acometer actuaciones para la correcta conservación de las obras albergadas.

Palabras clave: Conservación preventiva, contaminación atmosférica, patrimonio cultural, captación pasiva.

Abstract:

Preventive conservation at museums includes the control of different damaging factors. Among these factors we might find: incorrect relative humidity and temperature, light, physical forces, water or fire, pests, thieves and vandalism or dissociation, also atmospheric pollutants. The last ones mentioned constitute one of the most damaging factors, which lately are majorly investigated by researches. Nowadays, it is well known what kinds of pollutants are causing heritage damaging thanks to the current measuring systems, as well as how these pollutants cause negative effects on people, the environment, and also over cultural heritage. Still, a lot of research is needed about this topic and understand how pollutants and other factors affect art collections located inside museums. Hence, this project aims fundamentally to the study of certain atmospheric pollutants (NO_2 , SO_2 , O_3 , HCHO y CH_3COOH) in a concrete space context. In order to acquire knowledge related to this topic through passive sampling, the complutense art center, measures the risks associated to this damaging factors with the exposure of artwork which is and will be presented. As a result, we have detected the presence of high concentration of some of the measured pollutants; therefore, it is considered the necessity to undertake actions for the proper conservation of exposed artworks.

Keywords: Preventive conservation, air pollution, cultural heritage, passive sampling.

ÍNDICE

1. Introducción	2-3
2. Antecedentes y estado de la cuestión	4-7
3. Justificación	8-11
4. Objetivos	12-13
5. Metodología	14-15
6. Pasos previos al estudio de los contaminantes en el Centro de Arte Complutense: estudio de la contaminación atmosférica en Madrid	16-18
6.1. Niveles de concentraciones de contaminantes atmosféricos gaseosos en la Comunidad de Madrid. Estaciones: Casa de Campo y Cuatro Caminos. Medias año 2015	19-21
6.2. Actuaciones de mejora para la calidad del aire	21-22
6.3. Clima de Madrid	22-23
7. Centro de Arte Complutense. Investigación sobre los contaminantes que pueden afectar las colecciones	24-25
7.1. Colección textil de la Universidad Complutense de Madrid	26-27
7.2. Contaminantes contaminantes que pueden afectar las colecciones	28-29
7.2.1 Contaminantes de origen exterior	29-33
7.2.2 Contaminantes de origen interior	33-37
8. Sistemas de medición de contaminantes atmosféricos	38-41
8.1. Tubos pasivos <i>Radiello</i> ®	41-42
9. Efecto de los contaminantes atmosféricos	43-46
10. Límites de concentraciones de contaminantes atmosféricos recomendables en Museos	47-48
11. Posibles medidas correctoras	49-52
12. Muestreo de los contaminantes atmosféricos	53-58
13. Resultados y discusión	59-66
14. Efectos de los contaminantes sobre los bienes de la colección textil de la Universidad Complutense de Madrid	67-68
15. Conclusiones	69-70
16. Bibliografía	71-76
Anexos	

1. Introducción

La conservación del patrimonio cultural, dentro del que se incluyen los bienes conservados en los museos, requiere el conocimiento de los factores que inciden en su deterioro. De algunos de estos factores, como la humedad, la temperatura, los agentes biológicos, o la iluminación existe una amplia bibliografía y experiencia e incluso estándares establecidos para sus límites y control. Sin embargo, hay otros factores sobre los que, quizás porque su incidencia es menos evidente que para los citados, no existe un suficiente conocimiento.

Entre estos factores menos estudiados, al menos en España, se encuentran los contaminantes atmosféricos gaseosos, ya sean aquellos generados en el exterior de los museos e introducidos en éstos mediante la ventilación, o producidos en el interior de los museos por los propios materiales de construcción, pinturas interiores, aislamientos, conservantes de la madera, vitrinas, etc. y por los propios visitantes.

Los contaminantes de origen exterior más importantes son el dióxido de azufre (precursor del ácido sulfúrico), los óxidos de nitrógeno, especialmente el dióxido (precursor del ácido nítrico) y el ozono. En general, la concentración de la mayoría de estos contaminantes en la atmósfera se ha incrementado fuertemente durante los últimos siglos, fundamentalmente a causa de los vehículos y emisiones industriales. Los más importantes contaminantes atmosféricos generados en el interior son igualmente de efecto ácido, como son el ácido acético, el formaldehído (precursor del ácido fórmico) y el ácido sulfhídrico (fundamentalmente de origen orgánico). Al contrario que en el caso de los contaminantes de origen exterior, “los efectos de estos ácidos son conocidos desde la antigüedad y de hecho se aprovechaban en la obtención de determinados materiales a partir del efecto que producían en algunos metales. Ejemplo de ello, es la obtención del pigmento blanco de plomo, que era producido colocando en un recipiente plomo y vinagre (ácido acético),

cubriéndolo y dejando que el ácido acético y el CO₂ actuaran” (Lafuente 2011, pp. 72-73). De manera similar, mediante el empleo de vinagre sobre el cobre podía obtenerse verdigrís¹ (San Andrés *et al.* 2011, pp. 237-260).

Uno de los objetivos de la conservación preventiva es disminuir esta contaminación de riesgo para los bienes culturales, lo cual incluye minimizar la penetración de los contaminantes en el interior del edificio y reducir las fuentes de emisión en su interior. Para alcanzar este objetivo, se debe comenzar con un adecuado control de la calidad del aire en el ambiente interior del museo, determinando la presencia de contaminantes gaseosos en el aire que pueden dañar colecciones, ya sea directamente o a través de la conversión a productos secundarios (Grzywacz 2006, p. 4).

En cuanto al control del aire exterior, a nivel nacional, muchas de las comunidades (como Madrid) disponen de redes de cabinas fijas automáticas ubicadas en diferentes puntos de las ciudades que realizan mediciones de las concentraciones de los contaminantes atmosféricos en tiempo real y publican estos datos, que pueden consultarse de forma instantánea. Por tanto, al disponer de estos datos, sería posible realizar campañas de muestreo en el interior de los museos donde se quiera realizar un estudio de la contaminación interior existente y comparar así los resultados con los datos aportados por las cabinas automáticas exteriores para ver cómo influyen los niveles de concentración en el exterior sobre el ambiente interior.

Teniendo en cuenta todo lo indicado, se ha seleccionado un contexto espacial concreto, el Centro de Arte Complutense, con el objetivo de conocer, a través de muestreos mediante un sistema de captación pasiva, si existe riesgo sobre las obras que son y serán expuestas debido a la actuación de los contaminantes sobre las posibles obras albergadas.

¹ El verdigrís, como es sabido, es un pigmento que puede obtenerse a partir de la utilización de múltiples recetas. La más sencilla consiste en el empleo de vinagre o sus vapores sobre planchas de cobre.

2. Antecedentes y estado de la cuestión

El aire contaminado no es solo un fenómeno de los tiempos modernos. A lo largo de la historia se han producido numerosos casos de deterioros en obras de arte debidos a ciertos contaminantes atmosféricos. Ya en la prehistoria, el humo de los fuegos del interior de las cuevas oscureció las pinturas rupestres. También, los colores de las pinturas murales de Miguel Ángel en la Capilla Sixtina del Vaticano se han visto alterados por el humo de velas encendidas durante siglos. No obstante, fue a partir de la revolución industrial cuando aumentó la preocupación sobre los problemas producidos por los episodios que se dieron de alta contaminación del aire, los cuales tuvieron graves consecuencias sobre la salud de las personas (Grzywacz 2006, p. 1).

Según Lafuente (2011, p. 73) “Las primeras evidencias que se encuentran en la literatura científica sobre la degradación de objetos en museos debido a la presencia de contaminantes atmosféricos datan del siglo XIX”. Como señalaba Cecily M. Grzywacz (2006, p. 4), el interés en las condiciones ambientales de los museos comenzó cuando Loftus St. George Byne (1899) publicó el primer informe de los daños causados sobre colecciones por las condiciones de almacenamiento. Byne describió el deterioro de especímenes de concha, pero atribuyó erróneamente su causa al ataque bacteriano sobre los restos de animales en la misma, cuando realmente esta corrosión es causada por los vapores ácidos que son liberados por ciertos tipos de materiales usados en la construcción de contenedores para el almacenamiento de las colecciones. A pesar de ello, este tipo daño producido en los materiales aún se conoce como la enfermedad de Byne. Desde entonces, ha habido un número creciente de publicaciones sobre daños provocados en materiales por contaminantes gaseosos (Staniforth 2013, p. 276), pero es especialmente en la década de 1970 cuando se ve incrementado el número de informes de daños en las colecciones de museos (Grzywacz 2006, p. 4).

En 1978, en Londres, Garry Thomson publica su libro titulado *The Museum Environment*, en el que analiza los diferentes factores de deterioro encontrados en museos, entre los que se hallan los contaminantes atmosféricos.

Posteriormente, durante las dos últimas décadas del siglo XX, diferentes instituciones e investigadores realizaron numerosos estudios sobre los contaminantes atmosféricos que afectan al patrimonio cultural. Al principio, se hizo especial hincapié en aquellos que se encuentran al aire libre, ya que estos fueron considerados como algunos de los principales factores que afectan las colecciones de los museos (Schieweck 2016), quedando reflejado en documentos como *Protection of Works of Art From Atmospheric Ozone*, publicado por el Instituto de Conservación Getty, el cual es el primero de una serie de informes que tratan aspectos de las investigaciones llevadas a cabo por el instituto sobre temas ambientales en museos (Cass *et al.* 1989). No obstante, en 1987, la publicación de *Formaldehyde: How Great is the Danger to Museum Collections?* (Hatchfield & Carpenter 1987) llamó la atención a nivel internacional debido al problema planteado por este contaminante sobre las colecciones (Grzywacz 2006, p. 4) y durante los años noventa comenzaron a cobrar cada vez más importancia los estudios de los compuestos de origen interior en museos, tales como los ácido fórmico y acético (Schieweck 2016). Ejemplo ello es la Tesis Doctoral de Emilio Cano (2001) en la que analiza los efectos de los vapores de ambos en la degradación del cobre.

Reflejo de ese interés que se produjo en los contaminantes es la investigación que lleva por título *Pollutants in the Museum Environment* (1985- 1998), llevada a cabo por el Instituto de Conservación Getty (GCI), la cual constituye el primer estudio importante sobre los riesgos que, a largo plazo, se presentaban sobre las colecciones de los museos, provocados por los contaminantes atmosféricos. En sus comienzos (1985), la principal atención se centró en los contaminantes producidos en el aire exterior de los museos (óxidos de nitrógeno, ozono y dióxido de azufre) (Preusser & Druzik 1989), pero más tarde, en 1987, la investigación se expandió para incluir contaminantes

generados en el interior de los mismos, estudiando los de carácter orgánico (formaldehído, acetaldehído, el ácido fórmico y el ácido acético) (Grzywacz 1989). Para esta investigación se usaron muestras recogidas de galerías, trasteros, vitrinas y armarios de almacenamiento, que revelaron existían altos niveles de contaminantes, producidos por los materiales de construcción, encontrando las mayores concentraciones en lugares donde existía una circulación de aire reducida (Grzywacz 2006, p. 4).

En el siglo XXI, han continuado las investigaciones para determinar la posible correlación entre la existencia de contaminantes atmosféricos con los deterioros en materiales, además de estudiar sus efectos y sistemas de prevención, o intentar establecer límites de concentraciones dañinas para las obras (Blades *et al.* 2000; Tétreault 2003; Grzywacz 2006).

Estas publicaciones más recientes reflejan el resultado de investigaciones sobre contaminantes atmosféricos de origen exterior e interior de museos e implican la realización de muestreos activos y pasivos de las concentraciones del ambiente exterior e interior en las salas y almacenes, así como en el interior de vitrinas, ya que se ha demostrado a lo largo de los años que los propios materiales que conforman los contenedores de las obras en museos y almacenes no favorecen a su conservación, sino que por el contrario la empeoran. Ello se debe a que, bien por estos, bien por los propios materiales constituyentes de los objetos conservados, son emitidos una amplia variedad de compuestos orgánicos volátiles que pueden resultar dañinos para las obras (Tétreault 2003). Como resultado de estos estudios se concluye que, en general, la existencia de contaminantes gaseosos en mayor o menor medida es un hecho que sigue estando presente en museos actualmente pueden provenir del exterior o derivar de los materiales situados en el interior de estos museos (Schieweck y Salthammer 2011; Krupińska *et al.* 2012; Krupińska, Van Grieken y De Wael 2013).

Tétreault, ya citado, constituye uno de los autores más referenciados en documentos y artículos de investigación dedicados a la contaminación atmosférica en el interior de museos. Para la publicación de *Polluants dans les Musées et les Archives: Évaluation des Risques, Stratégies de Contrôle et Gestion de la Préservation* (Tétreault 2003), el autor realiza tablas que han sido y son muy útiles para establecer unas guías para determinar las posibles fuentes de contaminantes atmosféricos encontradas en el interior de museos, conocer los efectos producidos por ellos y establecer las posibles actuaciones a realizar a fin de lograr su control.

Más tarde, en el año 2006, Cecily M. Grzywacz, en su publicación *Monitoring for Gaseous Pollutants in Museum Environments* (Grzywacz 2006) hace una síntesis de pruebas realizadas durante años en entornos de museos. Se trata del primer manual que aborda específicamente la evaluación de la calidad del aire, enfocado a contaminantes atmosféricos, el cual sirve de guía para que el monitoreo en galerías, áreas de almacenamiento, vitrinas y almacenes esté disponible para profesionales de museos y otras instituciones de carácter cultural.

En la actualidad, en España existen grupos de investigación que estudian este factor de deterioro (Cardell *et al.* 2013; Lafuente, Cano y Martín 2013; Sánchez *et al.* 2015). Dichos grupos estudian el daño en ciertos tipos de materiales que pueden conformar los diferentes bienes, pero sin embargo, en España no se realizan campañas de medición de contaminantes atmosféricos de manera general en museos para detectar la presencia de estos en las salas o almacenes, ya que a pesar de existir estos límites de contaminación aconsejables expuestos por los diferentes autores anteriormente citados, la normativa y legislación sobre estos el interior de museos y archivos en la actualidad sigue siendo un tema pendiente de regulación.

3. Justificación

Además de haberse establecido los contaminantes atmosféricos como algunos de los agentes deterioro que afectan al patrimonio, existen numerosos estudios realizados en ambientes circundantes a los bienes culturales y sobre los materiales que están en contacto con esos, de los cuales se ha obtenido como resultado la constancia de la presencia de contaminantes gaseosos en elevadas concentraciones y que como consecuencia de ello el deterioro del patrimonio es un hecho.

De acuerdo a los estudios en los que se ha investigado el tipo de daño que estos gases provocan sobre muchos de los materiales que componen las obras se considera oportuno realizar mediciones de concentraciones de contaminantes, al igual que también son medidos otros factores de deterioro como la luz, la humedad relativa o la temperatura. Como resultado de los estudios de los grupos de investigación que integran la red COST *Action D42*² se exponen como principales motivos para la realización de muestreos de contaminantes en el entorno del Patrimonio los siguientes (COST Action D42 2010, p. 44):

- La necesidad de determinar si existe una exposición de los elementos culturales a contaminantes atmosféricos.
- La necesidad de realizar mediciones para comprobar si se superan los límites especificados (en caso de estar disponibles).
- La evaluación de la eficacia de las medidas correctoras implantadas.

De la misma manera, entre las razones para llevar a cabo el monitoreo de la calidad del aire en los entornos de los museos, expuestas en el Manual de

² Action D42 de trata de una red multidisciplinar que tiene como objetivo la conservación de bienes culturales. A nivel internacional se llevan a cabo investigaciones sobre las interacciones químicas entre los bienes culturales y el ambiente interior y sobre la estandarización, pero aún necesitan esfuerzos de coordinación. Por esto, el objetivo principal de Action es explorar las interacciones químicas entre los bienes culturales y las condiciones ambientales interiores a través de estudios de campo y experimentos de laboratorio.

Seguimiento de Contaminantes Gaseosos en Ambientes de Museos (Grzywacz 2006) publicado por The Getty Conservation Institute, se encuentran:

- La sospecha de existencia de un daño o riesgo este sobre los objetos a causa de la contaminación en el ambiente de la vitrina o lugar de almacenamiento.
- La existencia de un problema conocido de contaminación en el entorno y por consiguiente la necesidad de precisar de los datos de concentraciones.
- Llevar el control de concentraciones tras implantar medidas de mitigación para reducirlos.
- Puede desconocerse la eficacia de un edificio para mantener contaminantes generados en el aire libre, para lo que se pueden realizar mediciones tanto en el exterior como en el interior del edificio para comparar datos posteriormente.
- Otro motivo puede ser descartar un problema de calidad del aire en interiores.

De todos los anteriores, cuatro (salvo el tercero) de los cinco motivos posibles expuestos en el Manual de Seguimiento de Contaminantes Gaseosos en Ambientes de Museos son razones por las cuales se ha considerado oportuno realizar este estudio, ya que además de conocerse las elevadas concentraciones de contaminantes atmosféricos en Madrid, se pretende conocer si existe un posible riesgo por contaminantes generados en los contenedores expositivos y de almacenamiento, donde se encuentra albergada la colección estable del Centro de Arte Complutense, denominado también c arte c y que constituye el espacio museístico de la Universidad Complutense. A su vez, se pretende conocer cómo funciona el edificio en cuanto a barrera de los contaminantes originados en el exterior y descartar así un posible problema de calidad del aire en el interior de del centro.

Es posible que los escasos estudios de contaminantes atmosféricos en museos se hayan debido a que los equipos utilizados normalmente en la medición de

estos contaminantes son bastantes costosos. Sin embargo, como se expone en las investigaciones anteriormente citadas, a día de hoy se puede disponer de otros métodos para el estudio de estos contaminantes que se encuentran en el ambiente y que resultan asequibles y sencillos para establecer un control de los mismos en el entorno de los bienes culturales.

Por otro lado, dada la necesidad de conocimiento sobre este factor de deterioro en el entorno de los bienes culturales, cada vez existen más grupos de investigación e instituciones interesados en conocer los efectos de los contaminantes atmosféricos, en idear nuevos sistemas para el muestreo de éstos y en determinar posibles soluciones ante los problemas de conservación que originan. Además del crecimiento de la cantidad de estos grupos de investigación interesados en ello, también es importante resaltar la importancia de la difusión de conocimiento y el trabajo multidisciplinar que conllevan los estudios sobre este factor y una apropiada interpretación de los datos obtenidos en los muestreos. A nivel europeo, además de los grupos se han creado redes³ que los integran y que llevan a cabo campañas de monitoreo ambiental en salas de almacenamiento, galerías, vitrinas y bibliotecas, como es el caso de la red European Cooperation in Science and Technology (COST) *Action D42*. Esta red, ya citada, pretende realizar una selección de las investigaciones con resultados más fiables en cuanto a estudios sobre esta materia (COST Action D42 2010. p. 17), de lo que han derivado publicaciones como el libro titulado *Basic Environmental Mechanisms. Affecting Cultural Heritage. Understanding deterioration mechanism for conservation purposes*, editado por Dario Camuffo, Vasco Fassina y John Havermans (2010).

De los estudios realizados por los grupos de investigación que integran dicha red se ha demostrado que son diversos los factores, además de la ubicación y el tipo de fuente de emisión, que influyen en el ambiente del entorno de las obras, como son el aislamiento del edificio, la temperatura, la humedad o la

³ Una de las primeras redes dedicadas a investigaciones sobre el deterioro provocado en los bienes culturales por los contaminantes gaseosos fue establecida por la Society of Arts de Londres en 1898.

ventilación. Sin embargo, para determinar el riesgo al que quedan expuestos los bienes culturales frente a la presencia de dichos contaminantes y, en especial, los más sensibles a estos, existe la necesidad de mejorar el conocimiento de las concentraciones de contaminantes y la contribución de estos a la degradación de los diferentes bienes culturales (COST 2011).

4. objetivos

El objetivo general del presente trabajo fin de máster consiste en evaluar la calidad del aire y posibles contaminantes existentes en el Centro de Arte Complutense c arte c. De este modo, podría tratarse de fomentar soluciones medioambientales de cara a producir mejoras en la conservación de las obras expuestas en el Centro.

Como objetivos específicos del presente trabajo fin de máster, pueden establecerse los siguientes:

- Revisión bibliográfica de los posibles contaminantes atmosféricos en el entorno de los museos de modo que puedan establecerse hipótesis sobre aquellos que puedan afectar a este contexto museístico. Esta revisión ha contribuido a establecer unos primeros pasos en la realización del trabajo fin de máster ya que ha permitido conocer los posibles equipos a utilizar así como realizar planteamientos sobre su ubicación.
- Estudio de los diferentes sistemas de medición de contaminantes atmosféricos a fin de elegir los más adecuados para el desarrollo del estudio realizado en el presente trabajo fin de máster.
- Recopilación de datos existentes en contaminación atmosférica en el entorno del centro c arte c aportados por cabinas automáticas ubicadas en puntos cercanos al centro.
- Medición de contaminantes de origen exterior (NO_2 , SO_2 y O_3) y los de origen interior (CH_3COOH y HCHO) en el entorno del centro c arte c mediante un método de muestreo pasivo.

- Estudio bibliográfico de los diferentes efectos provocados sobre los bienes culturales por la existencia de contaminantes atmosféricos gaseosos en ambientes interiores.
- Estudio de las medidas correctoras que se pueden aplicar para reducir en lo posible las concentraciones de estos contaminantes y búsqueda del método más adecuado en caso de encontrarse concentraciones elevadas de los diferentes contaminantes en el interior de c arte c.

5. Metodología

- Para la elaboración del presente estudio, primeramente, se ha realizado un estudio bibliográfico de los posibles contaminantes atmosféricos en el entorno de los museos mediante la búsqueda de bibliografía existente.
- Esta revisión bibliográfica también se ha centrado en los diferentes sistemas de medición de contaminantes atmosféricos de los que se dispone en la actualidad y se ha seleccionado el método que se ha considerado más oportuno en función de los objetivos planteados en el estudio.
- Para realizar un análisis del entorno en que se encuentra el lugar de estudio elegido, el Centro de Arte Complutense, se ha llevado a cabo una recopilación de datos existentes en contaminación atmosférica en este contexto espacial, mediante el uso de los datos aportados por las cabinas automáticas en continuo del Ayuntamiento de Madrid (ubicadas en Casa de Campo y Cuatro Caminos) y del Instituto del Patrimonio Cultural de España (ubicada en la sede del IPCE) y también se han elaborado las correspondientes gráficas y medias para la comparación de concentraciones con los datos obtenidos en el muestreo con los tubos pasivos.
- La medición de concentraciones de contaminantes atmosféricos gaseosos en el interior de la sala de exposiciones c arte c se ha realizado mediante la instalación y posterior análisis en laboratorio de los tubos pasivos *Radiello*®.
- Tras ello, se ha realizado un estudio bibliográfico sobre los posibles efectos provocados sobre el patrimonio cultural por la existencia de contaminantes atmosféricos y se ha establecido una comparación de los límites sugeridos y los resultados de análisis de las concentraciones existentes en c arte c, para la determinación de un posible riesgo de deterioro sobre los objetos albergados en este.

- Por último, se ha realizado el correspondiente estudio de las medidas correctoras que se pueden aplicar para reducir en lo posible las concentraciones de estos contaminantes y se ha elaborado una propuesta adecuada en función de los resultados obtenidos en los análisis de concentraciones de contaminantes en la sala c arte c y los medios disponibles.

6. Pasos previos al estudio de los contaminantes en el Centro de Arte Complutense: estudio de la contaminación atmosférica en Madrid.

Puede definirse la contaminación atmosférica como “la presencia en la atmósfera de materias, sustancias o formas de energía que impliquen molestia grave, riesgo o daño para la seguridad y la salud de las personas, el medio ambiente y demás bienes de cualquier naturaleza” (Ayuntamiento de Madrid 2015). Su efecto está estrechamente relacionado con los tipos de contaminantes y la concentración de estos a los que están expuestos los diferentes entes. Esta exposición es una consecuencia de la ubicación y las características de las fuentes emisoras y las condiciones climáticas predominantes (Watt *et al.* 2009).

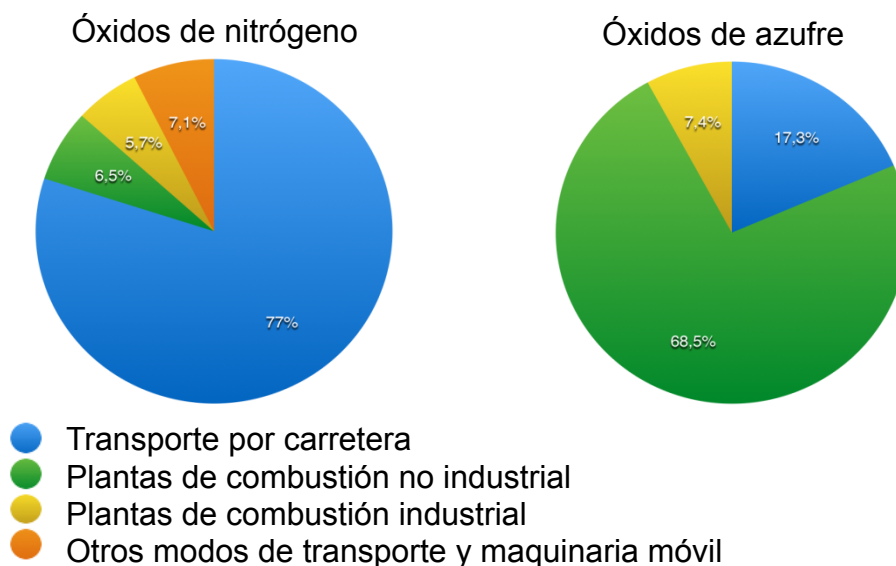
Los contaminantes atmosféricos gaseosos suelen clasificarse en primarios y secundarios. Los primarios son los emitidos directamente a la atmósfera, mientras que los secundarios son los producidos en la atmósfera por reacciones químicas entre los contaminantes primarios, generalmente en presencia de luz solar. Además de la clasificación anterior, los contaminantes pueden ser diferenciados según su naturaleza en inorgánicos (como el NO₂, el SO₂ y el O₃) y orgánicos (como el CH₃COOH y el HCHO) (Watt *et al.* 2009, p. 10; Gallego Picó *et al.* 2012, pp. 153-154).

En la mayoría de los casos, las fuentes de contaminación más importantes y perjudiciales para el medio ambiente se derivan de la acción del hombre. Sin embargo, además de estas, existen otras fuentes de emisión de los contaminantes como son las naturales (Ayuntamiento de Madrid 2015).

La contaminación que soportan las diferentes zonas variará de acuerdo a los tipos de fuentes que emiten esos contaminantes (Ayuntamiento de Madrid 2015). Los datos de fuentes de contaminación en la ciudad de Madrid según el inventario de emisiones son los siguientes (tabla 1, fig. 1):

Tabla 1. Datos de fuentes de contaminación en Madrid según el inventario de emisiones.

Fuentes emisoras de contaminantes	Óxidos de nitrógeno (%)	Partículas (%)	Monóxido de carbono (%)	Óxido de azufre (%)	COV's (%)
Transporte por carretera	77	72,8	91,4	17,3	33,2
Plantas de combustión no industrial (calderas de comercios, viviendas, oficinas)	6,5	13,2	5,4	68,5	
Plantas de combustión industrial	5,7			7,4	
Otros modos de transporte y maquinaria móvil	7,1	5,5	2,1		
Uso de disolventes y otros productos					53,5

Figura 1. Porcentajes de fuentes emisión de NO₂ y SO₂ en la ciudad de Madrid.

Existe un gran número de contaminantes en la atmósfera que pueden ser más o menos agresivos sobre los bienes culturales. Entre ellos destacan el óxido de azufre (SO_2), los óxidos de nitrógeno (NO_x , NO y NO_2), el ozono¹ (O_3), el amoníaco (NH_3), el ácido sulfhídrico (H_2S), el material particulado atmosférico y un elevado número de compuestos orgánicos volátiles (VOC) (Querol *et al.* 2012, p. 20).



Figura 2. Contaminación en Madrid [en línea] Disponible en: <http://www.elconfidencial.com> [Consulta: 08/05/2017].

Como señala el Protocolo de medidas a adoptar durante episodios de alta contaminación por dióxido de nitrógeno (Ayuntamiento de Madrid 2016, p. 1), aprobado por la Junta de Gobierno de la ciudad de Madrid de 21 de enero de 2016:

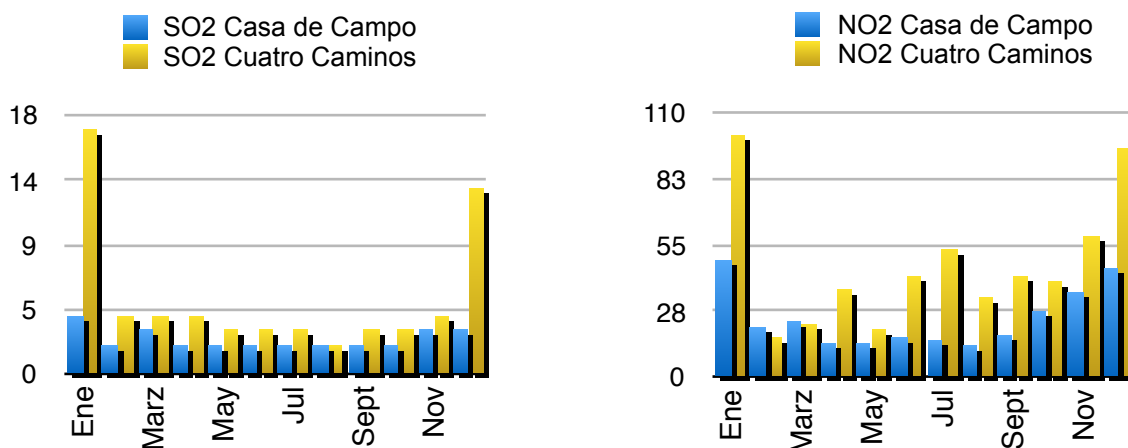
El Ayuntamiento de Madrid, para llevar a cabo el control de la calidad del aire de la ciudad, dispone del Sistema de Vigilancia, Predicción e Información de la Calidad del Aire, que permite conocer, de forma continua y en tiempo real, las concentraciones de contaminantes con el principal objetivo de proteger la salud de la población y reducir las situaciones de riesgo.

¹Este actúa positivamente en la estratosfera ya que reduce la radiación ultravioleta, pero en la troposfera tiene efectos negativos por su elevado poder oxidante.

6.1. Niveles de concentraciones de contaminantes atmosféricos gaseosos en la Comunidad de Madrid. Estaciones: Casa de Campo y Cuatro Caminos. Medias del año 2015

Dado que la mayoría de los datos obtenidos por una las cabinas automáticas (Casa de Campo) pertenecientes a la red del Ayuntamiento de Madrid durante el año 2016 resultan dudosos por sus valores extremadamente altos con respecto a los datos de otros años, se ha considerado oportuno tomar como referencia para los niveles de contaminación los datos obtenidos durante el año 2015. Los contaminantes SO_2 , NO_2 y O_3 , aparecen en las siguientes gráficas, elaboradas a partir de las medias mensuales obtenidas por las cabinas automáticas ubicadas en Casa de Campo y Cuatro Caminos, pertenecientes a la red del Ayuntamiento de Madrid (Ayuntamiento de Madrid 2015). Estas cabinas han sido seleccionadas en este trabajo dada su proximidad respecto al punto de estudio (la sala c arte c) ubicado entre ambas.

Como puede apreciarse en los tres gráficos (fig. 3, 4 y 5), existe para cada contaminante un período en los que los niveles de concentración son excesivamente elevados. No obstante, a pesar de no apreciarse en las gráficas, al tratarse de medias mensuales estos datos no representan los episodios de mayores concentraciones en los que se llega incluso a situación de alerta en la Comunidad de Madrid. Además, en las gráficas puede analizarse cómo funcionan dichos contaminantes e incluso intuirse su fuente de emisión:



Figuras 3 y 4. Medias de las emisiones mensuales de NO_2 y SO_2 en 2015.

En las gráficas del SO_2 y NO_2 (fig. 3 y 4) se observa que, para ambos, los niveles más elevados se encuentran en los meses de invierno, pudiendo deberse al uso de equipos de calefacción u otras actividades que conlleven su aparición. Además, como contaminantes primarios y precursores del ozono, sus concentraciones pueden disminuir en los meses más calurosos al reaccionar para formar ozono. También se puede apreciar en ellas como los valores de concentraciones medias más elevadas pertenecen a la cabina de Cuatro Caminos para ambos contaminantes, ya que esta, al contrario que la de Casa de Campo (fig. 5) (ubicada a las afueras de la ciudad), se encuentra situada en el centro de la ciudad, donde se encuentran en mayor proporción las fuentes de emisión principales de estos contaminantes, como podría ser el tráfico rodado.

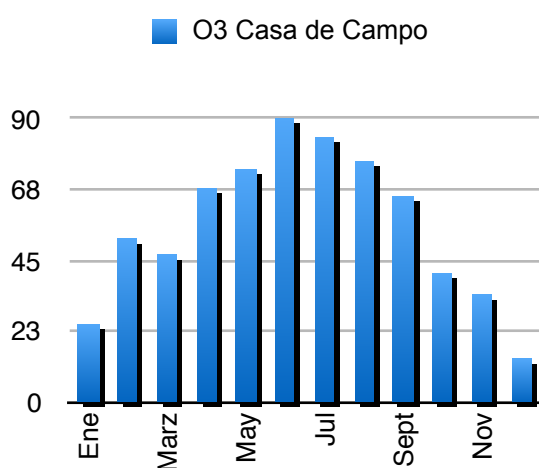


Figura 5. Medias de las emisiones mensuales de O_3 en 2015.

En la gráfica del O_3 (fig. 5) (la cabina de Cuatro Caminos no mide O_3) se puede observar cómo, al contrario que ocurre con los otros dos contaminantes, en los meses de verano resultan las medias más altas de concentraciones, lo que puede deberse a que los contaminantes primarios precursores de este contaminante, como sería el NO_2 , reaccionan en unas condiciones meteorológicas determinadas de altas temperaturas y radiación solar intensa, lo que da lugar a un aumento de concentración de ozono.

6.2. Actuaciones de mejora para la calidad del aire

Según Querol *et al.* (2012, p. 20), “la mejora de la calidad del aire en países plenamente desarrollados se basa en fijar objetivos muy estrictos para que su cumplimiento exija el perfeccionamiento de la tecnología ambiental o la aplicación de planes y estrategias que permitan alcanzarlos”.

Hasta el día de hoy, existen numerosas normas tanto europeas y nacionales como propias de cada comunidad autónoma en las que se regulan las emisiones permitidas y los niveles máximos establecidos, así como las medidas preventivas, de reducción y de control que se han de llevar a cabo en los casos en los que se detecten contaminantes atmosféricos, tanto en interior como en exterior de edificios.

Estas leyes tienen la finalidad de evitar, prevenir y reducir los efectos nocivos de las sustancias mencionadas sobre la salud humana, el medio ambiente en su conjunto y demás bienes de cualquier naturaleza. Como señala la web de la Comunidad de Madrid, “la Directiva 2008/50/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 21 de mayo de 2008, relativa a la calidad del aire ambiente y a una atmósfera más limpia en Europa, constituye la normativa de referencia en materia de calidad del aire en Europa” (Comunidad de Madrid).

Por otro lado, en España, “la legislación básica de carácter general en materia de calidad del aire está constituida por la Ley 34/2007, del 15 de noviembre, de Calidad del Aire y Protección de la Atmósfera” (Comunidad de Madrid). La normativa estatal específica ha sido unificada en el Real Decreto 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire. Este último establece umbrales de alerta para tres contaminantes, dióxido de nitrógeno, dióxido de azufre y ozono, y define el umbral de alerta como el nivel a partir del cual una exposición de breve duración supone un riesgo para la salud humana, que afecta al conjunto de la población y que requiere la adopción de medidas inmediatas (Comunidad de Madrid).

En Madrid existen protocolos de medidas a adoptar durante episodios de alta contaminación para cumplir los objetivos de las anteriores normas.

A pesar de que estas directivas, leyes, normas y planes establecen los límites en cuanto a la protección de la salud pública, el establecimiento de una normativa sobre límites aconsejables o permisibles de contaminantes atmosféricos en el interior de museos y archivos españoles sigue siendo un tema pendiente de regulación en la actualidad.

Dado lo anteriormente expuesto, se entiende la necesidad de realizar ciertas mediciones de contaminantes, principalmente velando por la salud de las personas, pero además, también con la intención de preservar el patrimonio, ya que los altos niveles de concentraciones de contaminantes atmosféricos en el entorno de museos, y sobre todo en aquellos situados en el centro de las ciudades son un hecho habitual. Por esto, debido a los conocidos altos niveles de contaminantes en la ciudad de Madrid, se ha considerado oportuna la realización de un análisis de las concentraciones de contaminantes en el Centro de Arte Complutense, ya que la presencia de estos pueden poner en riesgo las obras albergadas en su interior.

6.3. Clima de Madrid

El clima de Madrid es seco, con precipitaciones escasas y las temperaturas son bajas en invierno y altas en verano. Todo esto influye en las concentraciones de contaminantes presentes en la ciudad.

A continuación se presentan los datos de precipitaciones y temperatura de Madrid entre los días 18 y 28 de Abril de 2017 (tabla 2, fig. 6 y 7) en los que se realizó el muestreo de los diferentes contaminantes atmosféricos gaseosos:

Tabla 2. Datos de temperatura y precipitación del 18 al 28 de abril de 2017. Madrid: Ciudad universitaria. AEMET.

Ciudad universitaria. AEMET	Temperatura mínima (°C)	Temperatura media (°C)	Temperatura máxima (°C)	Precipitación (mm)
18/4/17	13.1	20.8	28.5	0.0
19/4/17	12.0	17.3	22.6	2.0
20/4/17	9.0	14.1	19.2	0.0
21/4/17	3.1	12.5	21.9	0.0
22/4/17	3.5	11.9	20.	0.0
23/4/17	6.1	15.8	25.6	0.0
24/4/17	9.7	18.4	27.2	3.1
25/4/17	11.5	17.9	24.3	0.0
26/4/17	6.2	13.6	21.1	1.3
27/4/17	2.9	9.2	15.6	0.0
28/4/17	2.9	10.5	18.1	1.8

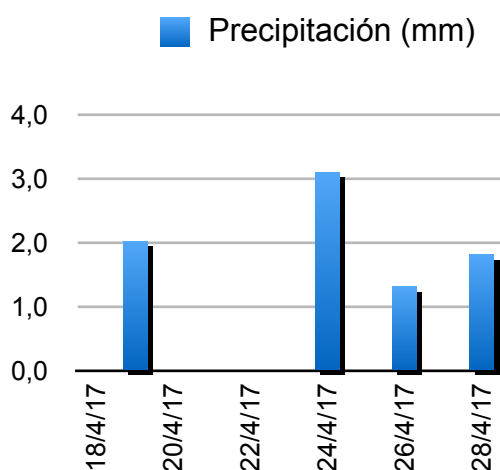


Figura 6. Datos AEMET de precipitaciones. Ciudad universitaria.

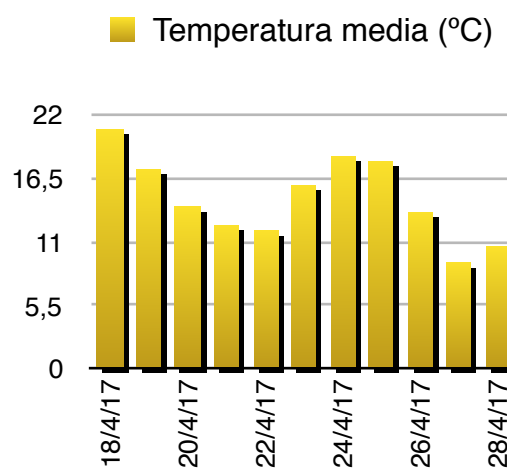


Figura 7. Datos AEMET de temperatura. Ciudad universitaria.

7. Centro de Arte Complutense. Investigación sobre los contaminantes que pueden afectar las colecciones.

Como se ha indicado, este estudio ha sido realizado sobre la sala Centro de Arte Complutense (c arte c) (fig. 8 y 10), perteneciente a la Universidad Complutense de Madrid. Se trata de una sala de construcción moderna, ubicada en el entorno de un Museo Nacional (Museo Nacional del Traje) y cerca de la Facultad de Bellas Artes (fig. 9). Constituye una sala en la que se realizan continuamente exposiciones temporales y que además hasta septiembre de 2017 ha albergado la colección de textiles de la Universidad Complutense de Madrid. La sala recibe visitas tanto individuales como en grupo y tiene un horario fijo en la que permanece abierta al público, por lo que es posible controlar los días y horas de apertura.

Por otra parte, debe indicarse que la metodología puesta en práctica para la sala es extrapolable a otras de características similares, con lo que podría ser utilizada en otros estudios.



Figura 8. Centro de Arte Complutense. © Isabel Sousa.

El horario de apertura de la sala al público es de martes a viernes con horario de 10:30 a 18:45h (de martes a sábado) y de 10:00 a 15:00h (domingos).

Ubicación: Av. Juan de Herrera, 2, 28040 Madrid



Figura 9. Ubicación del Centro de Arte Complutense [en línea] (<https://www.google.es/maps/place/C+Arte+C/@40.4402777,-3.7288204,15z/data=!4m5!3m4!1s0x0:0x1a933b420c47b7c6!8m2!3d40.4402777!4d-3.7288204>) [Consultado el 22 de Febrero de 2017].

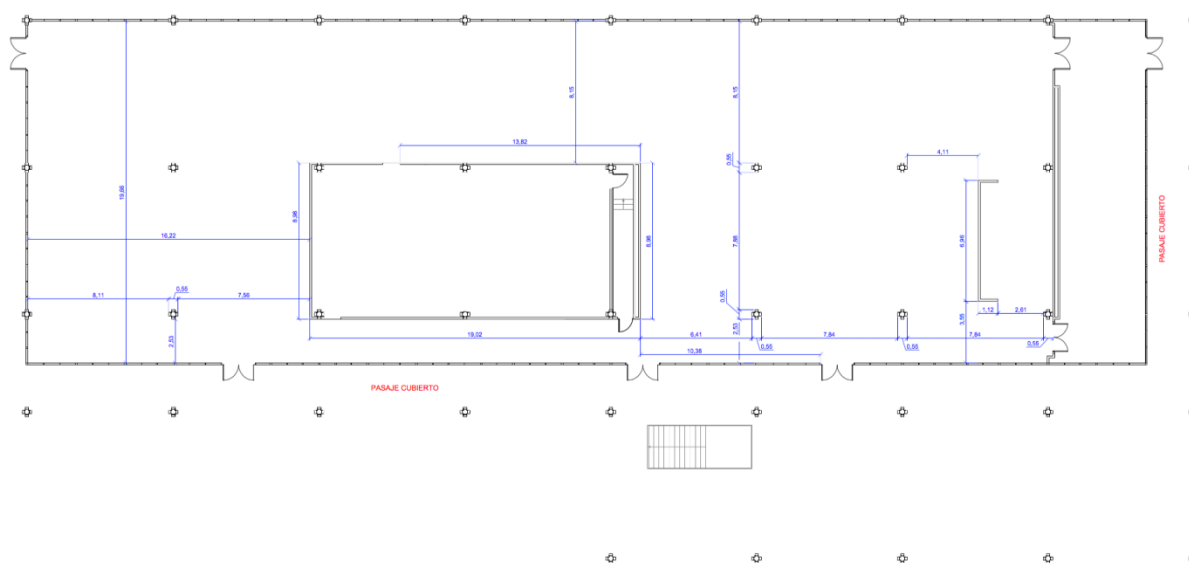


Figura 10. Plano del Centro c arte c.

7.1. Colección textil de la Universidad Complutense de Madrid.

La colección de piezas textiles pertenecientes a la Universidad Complutense de Madrid, como ya se ha citado en el apartado anterior, ha sido albergada hasta el mes de septiembre en el centro c arte c, por lo que en la fecha en la que se realizaron los análisis de contaminantes atmosféricos se consideró oportuno realizar un muestreo en el interior de una de las vitrinas que albergaba una de las piezas que conforma la colección, para poder comparar así los niveles de contaminación existentes en la sala con los del interior de esta y poder determinar si existe algún riesgo de deterioro por contaminantes atmosféricos sobre las piezas que son ubicadas en estos contenedores.

Dicha colección textil se encuentra albergada en unos contenedores de almacenamiento metálicos, compuestos por planeros de diferentes medidas y armarios, además de dos vitrinas, siendo una de estas en la que se realizó el muestreo de contaminantes atmosféricos. Parte de la colección es visitable, por lo que las piezas de algunos de estos cajones se encuentran dispuestas a modo expositivo, mientras que otras se encuentran almacenadas en grupo dentro de los mismos espacios.

El conjunto de piezas textiles, como se expone en el catálogo correspondiente a la colección, tiene “carácter extensivo y monográfico, en orden a la diversidad de piezas, pero no presenta conjuntos organizados entre sí, a excepción del sector de los dechados y el de los encajes, que son muy numerosos y pueden constituir muestras bastante homogéneas” (González Mena 1994, p. 15).

Las piezas y materiales que conforman la colección son muy variados (ver Anexo III), ya que comprende piezas de ajuar doméstico, encajes, dechados, muestras de tejidos o indumentaria popular, de la que sólo se conserva un traje completo. “El tejido es la materia básica para la confección de las diversas prendas que componen la indumentaria” (González Mena 1994, pp. 20-21). Los tejidos de la colección están compuestos por fibras muy diversas como lino,

cáñamo, seda o lana entre otras (González Mena 1994), y además, las piezas contienen elementos decorativos metálicos como son la chapería o los hilos entorchados, entre otros (Seisdedos Ribera 2015).

Como cita Carolina Rubio González (2015, p. 76), según Berthod y Hardouin-Fugier (1992) los hilos entorchados se dividen en tres categorías:

Los hilos finos, que podían tener alto contenido de oro o plata o bien de plata dorada; los hilos medianamente finos, que eran elaborados con latón o cobre, ya sea dorado o plateado; y por último, los hilos falsos, los cuales podían ser de plata falsa, es decir, de un metal con muy bajo contenido de plata, o bien, de oro falso. En este último caso, el metal no contiene oro sino que una alta cantidad de cobre con una capa de latón y metal blanco, que es la aleación de cobre, zinc y níquel.

El fondo de piezas de la colección de indumentaria popular está compuesto por abundantes piezas del traje de la mujer y por un escaso número de piezas del traje del hombre (González Mena 1994).

En concreto, la pieza expuesta en la vitrina donde ha sido realizado el muestreo de contaminantes atmosféricos se trata de una prenda femenina, una camisa de mujer (fig. 11) (medidas: 48 x 80 cm y largo de la manga: 72 cm), del siglo XVIII, perteneciente a la escuela de Huelva. Esta prenda es de lino e hilo de seda, y previamente contenía cuatro pares de enganches metálicos modernos cosidos con hilo de algodón, los cuales fueron retirados entre los años 1998-2002, en los que se sometió a la pieza a ciertas acciones de conservación, entre las que se realizó una desinsectación y varias limpiezas mecánicas por aspiración.



Figura 11. Camisa de Mujer. S.XVIII. Colección textil de la Universidad Complutense de Madrid. © Isabel Sousa.

7.2. Contaminantes atmosféricos que pueden afectar a las colecciones.

Como expone Isabel García Fernández (2013, pp. 213-214):

La calidad del aire dentro de los museos está representada por la suma total de los contaminantes procedentes del exterior más los generados en el interior por las actividades museográficas, la presencia de visitantes, la degradación de los materiales empleados en la construcción del edificio y en los equipamientos utilizados en almacén y exposición, los que provienen de la degradación de los objetos y especímenes (contaminantes intrínsecos) y los producidos por contacto; menos la suma de todos los contaminantes eliminados por la aplicación de procesos de extracción.

En el entorno de los museos, existen diversas vías para que los contaminantes alcancen los objetos de la colección y causen deterioro en ellos, bien sea porque los contaminantes son transportados en el aire, por ser transferidos entre dos materiales en sus puntos de contacto, o bien por derivar de los materiales que componen el propio objeto o formarse durante las reacciones químicas producidas sobre o dentro de él (Tétreault 2003).

Los principales contaminantes atmosféricos existentes en el interior de la sala Centro de Arte Complutense (c arte c), objeto de este estudio, tienen principalmente dos orígenes diferentes: exterior e interior al museo. Aunque “los contaminantes pueden ser gases, aerosoles, líquidos o sólidos” (García Fernández 2013, p. 214), este estudio se ha centrado únicamente en los contaminantes de tipo gaseosos, tanto de origen tanto exterior como interior. No obstante, dadas ciertas limitaciones económicas, el estudio se ha centrado en medir, de entre los contaminantes de origen interior o exterior, los que, según las fuentes bibliográficas que han surgido como resultado de investigaciones similares, podrían resultar más dañinos para las obras que se pretenden conservar, dada la tipología de la colección permanente de este

museo y que, además, suelen encontrarse en mayores concentraciones en el interior de salas, vitrinas y otros contenedores de almacenamiento, debido a los materiales usados en su fabricación. Dado esto, se ha considerado conveniente el estudio de los siguientes contaminantes: ozono, óxidos de nitrógeno, dióxido de azufre (origen exterior) y ácido acético y formaldehído (origen interior).

7.2.1 Contaminantes de origen exterior

De acuerdo a Isabel García (2013, p. 214) “la contaminación exterior está determinada entre otros factores por el clima, la geografía, las fuentes de energía utilizada, el número y tipo de actividades industriales y la afluencia de vehículos”.

Las fuentes de las que provienen estos contaminantes pueden ser de origen natural o antropogénico, teniendo la mayoría de los contaminantes atmosféricos ambos orígenes. Entre las fuentes naturales se encuentran los relámpagos, erupciones volcánicas, procesos microbiológicos naturales en el suelo (acción bacteriana), suelos sopladados por el viento y animales. Entre las fuentes antropogénicas de los contaminantes atmosféricos, se encuentran actividades como la generación de energía, la quema de combustibles en automóviles y las funciones domésticas (Watt *et al.* 2009; Thomson 1998; Ayuntamiento de Madrid 2015).

Entre los contaminantes atmosféricos de origen exterior más importantes presentes en las ciudades, y que afectan al patrimonio, se encuentran el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre, como contaminantes primarios, y el ozono, como secundario:

Dióxido de nitrógeno (NO_2)

Según cita Gallego Picó *et al.* (2012, p. 73), “los óxidos de nitrógeno son un grupo de gases de los cuales los más representativos son el óxido nitroso (N_2O) y los NO_x . Estos últimos los conforman fundamentalmente el dióxido de nitrógeno (NO_2) y el monóxido de nitrógeno (NO)”. El NO_2 es el compuesto más común dentro del grupo de óxidos de nitrógeno (NO_x), ya que el NO , “cuando es emitido a la atmósfera, reacciona rápidamente con el oxígeno del aire para generar dióxido de nitrógeno” Gallego Picó *et al.* (2012, p. 74). El NO_2 es un contaminante primario debido a que “es emitido directamente por la fuente emisora, aunque una vez en el aire pueden dar lugar a una serie de reacciones que produzcan nuevos contaminantes secundarios como el ozono o el ácido nítrico” (Gallego Picó *et al.* 2012, p. 74).

El dióxido de nitrógeno puede ser emitido como consecuencia de procesos naturales, como la actividad de los microorganismos del suelo, tormentas, y por la oxidación del monóxido de nitrógeno natural, o bien puede ser emitido por fuentes antropogénicas (Tétreault 2003; Gallego Picó *et al.* 2012, p. 73). De entre estas últimas la más importante es el tráfico rodado, debido a que el nitrógeno del aire se oxida en las condiciones de alta temperatura que se dan en el proceso de combustión de los motores de los vehículos (destacando las emisiones de los vehículos diésel), junto con las emisiones precedentes de la utilización de combustibles fósiles en la generación de energía eléctrica y la industria (García Fernández 2013, pp. 216-217; WHO 2005, p. 13; Gallego Picó *et al.* 2012, pp. 74-75). En los procesos de combustión, el carbón es el combustible más importante, ya que el petróleo y el gas contienen niveles mucho más bajos de nitrógeno (WHO 2005, p. 13). En general, en Europa, más del 40% de las emisiones de óxidos de nitrógeno provienen del transporte por carretera (EEA 2014); sin embargo, dentro de las grandes ciudades, como en el caso de Madrid, las contribuciones del tráfico como principal emisor de NO_x asciende a porcentajes cercanos al 80% (Gallego Picó *et al.* 2012, pp. 74-75; Ayuntamiento de Madrid 2015).

Dióxido de azufre (SO₂)

Respecto a las fuentes emisoras naturales de este contaminante, destacan las erupciones volcánicas y las emisiones procedentes de los océanos. Las emisiones volcánicas, tanto en períodos activos como latentes, a nivel mundial constituyen quizás el 20% de las emisiones totales de azufre del mundo. Sin embargo, especialmente en las zonas urbanas, las emisiones que se derivan de la quema de combustibles fósiles sólidos son de mayor preocupación (MARM 2011; Watt *et al.* 2009, p.12).

Las fuentes antropogénicas principales son la combustión de carburantes con cierto contenido en azufre (el carbón y el fuel-oil son los combustibles que poseen una mayor relevancia, ya que su contenido en azufre es comparativamente mayor a los del resto), seguida de los vehículos a motor (Ayuntamiento de Madrid 2015; Gallego Picó *et al.* 2012, p. 76; WHO 2005, p. 13). Actualmente, alrededor del 60% de las emisiones de óxidos de azufre en Europa provienen de la producción de la energía eléctrica (EEA 2014). Sin embargo, como se citó anteriormente, en Madrid la fuente predominante son las plantas de combustión no industrial (calderas de comercios, viviendas, oficinas), produciendo hasta cerca de un 70% de las emisiones totales de este contaminantes (Ayuntamiento de Madrid 2015).

No obstante, “en general, en España las concentraciones de estos gases se sitúan muy por debajo de los señalados como límite en la legislación vigente. La concentración de SO₂ ha disminuido de manera considerable en los últimos años” (García Fernández 2013, p. 217). Estas emisiones descendieron en el periodo entre 1990 y 2009 como consecuencia de la disminución de actividad de las centrales térmicas convencionales de carbón y por la reducción del contenido de azufre de los combustibles del transporte (MARM 2011; Gallego Picó *et al.* 2012, p. 76).

Las concentraciones externas de SO₂ pueden alterarse de manera muy repentina, ya que, por ejemplo, con la lluvia bajan las concentraciones (y por tanto la concentración en el interior del museo queda más alta a la exterior) (García Fernández 2013, p. 217). En cuanto a las concentraciones detectadas en museos, debido a que el SO₂ reacciona rápidamente con muchas superficies, como el yeso fresco, sus valores suelen ser menores en el interior que en el exterior de los museos (del orden de la mitad) (Thomson 1998, p.136; García Fernández 2013, p. 217). Por otra parte, el SO₂ puede reaccionar con el vapor de agua y formar ácido sulfúrico y sulfhídrico pudiendo producirse estas reacciones en el interior de los edificios, donde la deposición de estos sobre las colecciones puede provocar su deterioro. (García Fernández 2013, p. 217).

Ozono (O₃)

El ozono troposférico es un contaminante secundario, el cual “se forma a partir de ciertos precursores que tienen su origen en los procesos de combustión” (Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente). “Esta característica hace que su control sea más difícil que en el caso de los contaminantes que se emiten directamente y que pueden ser atajados en la fuente” (Gallego Picó *et al.* 2012, p. 88). Es importante señalar que el ozono al nivel del suelo se clasifica como un contaminante, a diferencia del ozono estratosférico, que es natural y actúa como filtro de la radiación UV del sol, como ya se ha indicado. El ozono troposférico se forma principalmente a partir de la unión del oxígeno presente en la atmósfera con los átomos de oxígeno generados en la descomposición de NO₂ en NO en presencia de UV (luz solar), y resulta muy peligroso, ya que puede producir daños en nuestra salud, en la vegetación y en los materiales (Ayuntamiento de Madrid 2015; Watt *et al.* 2009). Al contrario que para los otros contaminantes, generalmente “las concentraciones más elevadas de ozono se alcanzan en las zonas rurales o periurbanas que rodean a ciudades o centros de emisión de precursores y situadas en la dirección de los vientos dominantes” (Larka Abellán *et al.* 2009).

De acuerdo a Larka Abellán *et al.* (2009), las concentraciones de ozono varían según la época del año y hora del día: “En zonas afectadas por fuentes emisoras de precursores de ozono, las máximas concentraciones ocurren generalmente en primavera y verano, cuando las condiciones meteorológicas favorecen las reacciones fotoquímicas que lo forman”, ya que “la luz solar es uno de los principales factores que influyen en estas reacciones” (Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente). Con respecto a su ciclo diario, en general, “los valores máximos se alcanzan a mediodía, cuando la radiación solar es más intensa y la temperatura es más elevada, y descienden al caer la tarde, siendo mínimos durante la noche”. Por otro lado, en Europa, “existen en la actualidad muchos lugares donde las concentraciones medias horarias diurnas registradas en verano rara vez caen por debajo de los valores establecidos en las leyes para la protección de la salud humana y de la vegetación” (Gallego Picó *et al.* 2012, p. 91). “Los niveles de ozono en la troposfera se han incrementado de forma importante en muchas partes del mundo durante el último siglo” y “se espera que su concentración continúe aumentando durante las próximas décadas” (Gallego Picó *et al.* 2012, p. 88).

En el interior de edificios, el O₃ “se produce en ciertos tipos de lámparas y equipos eléctricos utilizados; entre otros, fotocopiadoras, purificadores de aire electrostáticos y mata insectos electrónicos” (García Fernández 2013, p. 217). Si las salas de exposición no disponen de mecanismos adecuados de climatización, la concentración de este contaminante puede alcanzar el 60-100% del nivel de concentración existente en el exterior de estas (Velázquez de Castro González 2012, p. 25).

7.2.2 Contaminantes de origen interior

La contaminación, que es cada vez más un problema en cualquier lugar; no sólo es resultado de los procesos industriales y la quema de combustibles, sino que también existen otros orígenes, como pueden ser la emanación de los propios materiales de construcción utilizados en el interior de los espacios o los

materiales que conforman el mobiliario, el acabado de habitaciones y vitrinas o los propios visitantes y objetos de la colección (Tétreault 2003, CCI 1993; Maroto, P. 2016, pp. 31-32). “En términos generales las concentraciones de estos contaminantes en interiores exceden a las detectadas en el exterior” (García Fernández 2013, p. 220).

De acuerdo a García Fernández (2013, p. 220): “Los contaminantes producidos en el interior del museo que suponen un riesgo serio para el patrimonio son: el sulfuro de hidrógeno, el ozono y las partículas en suspensión; a los que hay que añadir los compuestos orgánicos: los compuestos orgánicos volátiles (COV) y compuestos carbonilos”. Los compuestos orgánicos volátiles (COV) “son un grupo de compuestos pertenecientes a diferentes familias químicas (alcoholes, aldehídos, cetonas, éteres de glicol, terpenos, etc.) que tienen en común su base química de carbono y la particularidad de volatilizarse en el aire en estado gaseoso a temperatura ambiente” (Maroto, P. 2016, pp. 31-32). En el interior, dichos compuestos “son ampliamente utilizados en la fabricación de diversos productos, materiales decorativos y de construcción: pinturas, barnices, colas, limpiadores, madera, alfombras, telas, ambientadores, biocidas, etc.” (Maroto, P. 2016, pp. 31-32).

Como cita García Fernández (2013, p. 220) “aunque la mayoría de los compuestos orgánicos volátiles contienen grupos carbonilos, los contaminantes orgánicos carbonilos encontrados en museos son el formaldehído y acetaldehído y los ácidos orgánicos: ácido fórmico y ácido acético”. Por esto, en las tablas que hacen referencia a los límites aconsejables de contaminantes en el interior de museos se establecen máximos solo para estos (ASHRAE 2007). Como ya se ha indicado anteriormente, para este estudio se han muestreado el ácido acético y el formaldehído.

Ácido acético (CH_3COOH)

Tanto el ácido acético como el fórmico proceden de muchas fuentes de emisión dentro de las atmósferas de interior (Lafuente 2011, p. 74). El ácido acético se genera principalmente cuando se utilizan productos inapropiados y puede causar problemas en espacios herméticos. La construcción de un espacio con madera y pinturas de baja calidad causa problemas de emisión de este contaminante (Tétreault 2003). Por otra parte, al igual que ocurre con materiales compuestos por nitrato de celulosa que emiten dióxido de nitrógeno, el ácido acético puede ser emitido por el acetato de celulosa usado para la elaboración de soportes de películas o en la industria textil.

Formaldehído (HCHO)

Se trata de uno de los contaminantes más importantes en cuanto a la calidad del aire interior debido a sus propiedades químicas y a los graves efectos en la salud (Morales, Blanco y García 2010, p. 26). “En un ambiente interior el valor óptimo debería ser 0,0 ppm, ya que cualquier valor por encima declara que existe una fuente de emisión” (Sánchez de León Linares, L. J. 2016, p. 73). “Entre sus propiedades físico-químicas se encuentran su capacidad de disolución en el agua, aunque por corto período de tiempo, y su degradación más o menos rápida en el aire, siendo sus productos de descomposición ácido fórmico y monóxido de carbono” (Morales, Blanco y García 2010, p. 26).

Las cifras establecidas de concentraciones que no debe superar este contaminante para el efecto en la salud en personas no son aplicables en la determinación de los niveles de seguridad de los bienes culturales, ya que la corrosión de ciertos materiales como el plomo se puede producir en entornos de almacenamiento de museo con concentraciones de formaldehído por debajo de los que admisibles para la salud (Hatchfled y Carpenter 1986, pp. 183-188).

Las principales fuentes en interiores de formaldehído incluyen espumas de aislamiento y productos de madera (debido a la resina usada en el proceso de fabricación de tableros de madera para la unión de sus partículas y a veces recubiertos también por resinas de melamina y urea formaldehído). Este contaminante también se encuentra presente en algunas pinturas, revestimientos y otros materiales (Hatchfield y Carpenter 1986, pp. 183-188).

Además de encontrar fuentes de emisión de formaldehído y de ácido acético en el interior de los museos, también podemos encontrar fuentes de emisión de los contaminantes **dióxido de azufre y dióxido de nitrógeno**, aunque en este caso las emisiones producidas por estas fuentes interiores al museo para estos contaminantes sean menores que las emisiones de fuentes exteriores.

En cuando a las posibles fuentes del dióxido de nitrógeno en las colecciones de museos, las más importantes serían algunos materiales que son elaborados con nitrato de celulosa como materiales fotográficos o discos, y las imitaciones de la seda, lacas, adhesivos o telas impregnadas (García Fernández 2013, p. 216).

Según Tétreault (2003) las fuentes de emisión del dióxido de azufre encontradas en el interior de museos son algunos materiales como los cauchos vulcanizados con azufre, los compuestos presentes en las muestras geológicas, y algunos colorantes.

Las concentraciones de los contaminantes en el aire en este estudio se expresan en $\mu\text{g}/\text{m}^3$. El μg es la millonésima parte de un gramo y el m^3 se refiere, aunque no se indique (es normal que se exprese también como Nm^3) al metro cúbico de aire en condiciones normales de presión (1 atm) y temperatura (0 °C).

A veces la concentración de los gases se expresa en las teóricas proporciones en volumen del contaminante y del aire si se separaran, concretamente en partes por millón (ppm) o partes por billón (billón “americano”, es decir, mil millones) (ppb).

La fórmula de conversión es: $1 \text{ ppb} = 0,0409 \text{ M } \mu\text{g}/\text{m}^3$, siendo M el peso molecular del gas contaminante (Tétreault 2003). Por ejemplo, para los contaminantes de origen exterior considerados la relación será:

Tabla 3. Conversión de ppb de volumen de aire a $\mu\text{g}/\text{m}^3$

ppb	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
1 ppb de NO_2	1,88 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de NO_2
1 ppb de SO_2	2,63 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de SO_2
1 ppb de O_3	1,96 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de O_3
1 ppb de CH_3COOH	2,43 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de CH_3COOH
1 ppb de HCHO	1,23 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de HCHO

8. Sistemas de medición de contaminantes atmosféricos

Para la medición de contaminantes gaseosos puede disponerse de diversos métodos y dispositivos, como los que aparecen expuestos en el manual *Monitoring for Gaseous Pollutants in Museum Environments* (Grzywacz 2006), que varían tanto en técnica y complejidad como en su tamaño y costo. Además, existen proyectos actuales como es “MEMORI”, integrado por diversas instituciones, asociaciones y diferentes grupos de investigación pertenecientes a departamentos de universidades (SIT, Tate, Universidad de Pisa, etc), el cual incluye entre sus investigaciones los efectos de contaminantes atmosféricos sobre diversos tipos de materiales (pigmentos, barnices, cueros, pergamino, textiles y papel) y estudia el diseño de un nuevo dispositivo de control y medición de los contaminantes para la protección del patrimonio, que consiste en un dosímetro de alerta temprana para la evaluación del ambiente interior. Este combina las ventajas de otros dosímetros anteriormente desarrollados, dando lugar a un dispositivo sensible a los contaminantes inorgánicos (NO_2 y O_3) y los ácidos orgánicos, además de a la temperatura, la humedad relativa y la luz UV (MEMORI; IAQ 2014).

Dada la diversidad de métodos de muestreo es importante tener en cuenta varios factores que serán decisivos para cumplir los objetivos planteados. En función de la finalidad que tenga nuestro estudio, las mediciones de concentraciones de contaminantes que se realicen pueden implicar un muestreo continuo, periódico o puntual. El muestreo continuo consiste en la toma de muestras de forma continua durante un periodo de tiempo (mes, año, etc.), del que se obtienen datos en tiempo real o en periodos predefinidos (diezminutales, horarios, etc.). El muestreo periódico consiste en toma de muestras bien sea, semanal, mensual o estacional, y el muestreo puntual se realiza en determinados días y horas (Gallego Picó *et al.* 2012, pp. 157-158).

De acuerdo a Gallego Picó *et al.* (2012, p. 158), “la metodología para la medida de los contaminantes atmosféricos se puede dividir en grupos genéricos, que cubren los más amplios rangos de costes y características de funcionamiento”:

- Sensores remotos.
- Analizadores automáticos en línea.
- Muestreadores activos.
- Muestreadores pasivos.

Los dos últimos, muestreadores activos y pasivos, suponen una metodología discontinua, ya que requiere análisis en el laboratorio, mientras que los dos primeros, analizadores automáticos y sensores remotos, pertenecen a la metodología continua, que proporcionan los datos en tiempo real. Las características de estos grupos son las siguientes:

Sensores remotos: Aportan datos de un determinado espacio, resultando útiles cerca de las fuentes. Por otro lado, resulta muy compleja su calibración y validación y no siempre son comparables con medidas puntuales (Fernández Patier 2007).

Analizadores automáticos: “Ofrecen muy buenas características de calidad o fiabilidad en los resultados, presentando datos horarios e información en tiempo real” (Fernández Patier 2007). Estos “combinan la toma de muestra con la detección analítica para simplificar y acelerar la determinación de los contaminantes” (Gallego Picó *et al.* 2012, p.169).

Además de las anteriores, los analizadores automáticos presentan otras ventajas ya que, como se expone en el Manual de seguimiento y análisis de condiciones ambientales redactado por Herráez *et al.* (2014, p. 37), estos “muestran no solo los niveles de concentración, sino también su evolución y cambios puntuales en la concentración, muy útiles para investigar fuentes de contaminación”.

Sin embargo, se tratan de equipos complejos, costosos, que requieren alta formación para su manejo y suponen costes elevados (Fernández Patier 2007).

Muestreadores activos: Son más costosos que los muestreadores pasivos (Gallego Picó *et al.* 2012, p. 163). Sin embargo, son fáciles de operar de forma segura y pueden proporcionar datos históricos. Las medias realizadas mediante estos son diarias y requieren un trabajo intensivo y un análisis en el laboratorio (Fernández Patier 2007). “La muestra se obtiene mediante una bomba de aspiración que hace pasar el aire a través de un filtro y retiene los contaminantes en un captador de fase gaseosa o de materia particulada” (Herráez *et al.* 2014, p. 37).

Muestreadores pasivos: La técnica de medición mediante el uso de muestreadores pasivos es la más usada para la medición de concentraciones de contaminantes atmosféricos en contacto con los bienes patrimoniales (Herráez *et al.* 2014, p. 37). Se basa en la exposición de estos en el ambiente objeto de estudio, durante un apropiado período de tiempo (que puede ser de horas, días o incluso meses). El dispositivo captador, mediante un proceso físico de difusión o permeación, recoge los contaminantes por adsorción o absorción en un sustrato químico seleccionado. Tras esto, la muestra se regresa al laboratorio donde se realiza la desorción del contaminante para ser analizado cuantitativamente. Los equipos utilizados se conocen como muestreadores pasivos, que se presentan en diversas formas y tamaños, principalmente en forma de tubos o discos (Gallego Picó *et al.* 2012, pp. 160-161; Instituto Nacional de Ecología 2010, p. 17). Estos muestreadores son muy económicos, sencillos de instalar y operar y resultan de utilidad para estudios de base. Por otro lado, no son útiles para algunos contaminantes y, por lo general, proporcionan medidas semanales o mensuales (Fernández Patier 2007).

Existen diferentes tipos de muestreadores pasivos disponibles para los principales contaminantes, entre los que se encuentran los dosímetros pasivos

personales, los tubos de difusión de Palmes, los barboteadores pasivos, los tubos colorimétricos o los papeles indicadores en forma de tiras o parches dérmicos, entre otros (Gallego Picó *et al.* 2012, pp. 161-162; Grzywacz 2006).

Varias han sido las razones que han propiciado el empleo de este tipo de muestreo para los objetivos planteados en este estudio: la imposibilidad del uso de otros métodos de muestreo en el interior del centro c arte c, el amplio costo que supondría el uso de otras técnicas de muestreo, el reducido espacio del que se disponía para la medición en el interior de la vitrina y, por último, la sencilla instalación del sistema.

Entre los diferentes métodos de muestreo existentes en el mercado, se ha considerado el que emplea los captadores pasivos *Radiello*®, ya que se han realizado estudios con estos en museos que demuestran su eficacia para la determinación de contaminantes en estos ambientes, como son las investigaciones realizadas por Krupińska, B. *et al.* (Krupińska *et al.* 2012; Krupińska *et al.* 2013) entre el periodo de noviembre de 2008 y febrero de 2012, en el Museo Plantin-Moretus (Amberes, Bélgica) en el que se muestrearon el SO₂, NO₂ y O₃, y los ácidos acético y fórmico, para lo que se expusieron los tubos de difusión pasiva durante 7 días en cada campaña de muestreo realizadas tanto fuera del museo, como en diversas galerías y en vitrinas.

8.1. Tubos pasivos *Radiello*®

El método de muestreo mediante el uso de tubos de captación pasiva *Radiello*® (ver Anexo II) ha sido desarrollado fundamentalmente en estudios de seguridad e higiene en el trabajo. Este método ha cobrado relevancia en los últimos 20 años, ya que se trata de un método de muestreo pasivo sencillo y eficiente, que no precisa de bomba de operación o calibración. Otras ventajas de su empleo son que pueden ser instalados en sitios no visibles, no necesitan alimentación eléctrica de ningún tipo, no requieren supervisión, no son inflamables o no emiten ruidos (SIGMA- ALDRICH 2006).

Estos son dispositivos de pequeño tamaño, que contienen una sustancia específica que va captando uno o varios de estos contaminantes. Después de su exposición durante el período de muestreo, son analizados en el laboratorio, obteniéndose la información de la contaminación existente (Ver Anexo I).

Hasta ahora, en España no se tiene constancia del uso de estos tubos para el control habitual en los museos, aunque podría ponerse en práctica, sobre todo en museos situados en la ciudad, donde a día de hoy la contaminación existente es cada vez mayor.

El laboratorio IPROMA ha sido el encargado de aportar este tipo de tubos y llevar a cabo su análisis, tratándose del laboratorio de referencia en Europa para la medición de contaminantes mediante tubos pasivos *Radiello®* (fig. 12).

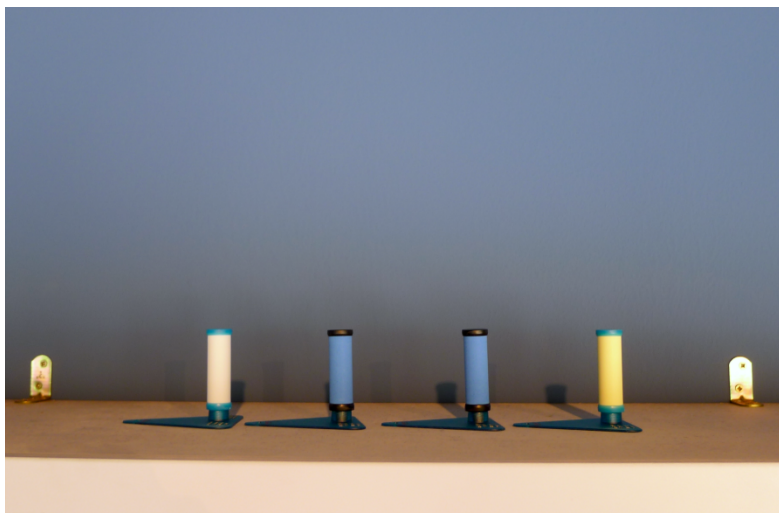


Figura 12. Tubos de muestreo de contaminantes atmosféricos gaseosos *Radiello®*. © Isabel Sousa.

9. Efecto de los contaminantes atmosféricos

En general, los efectos de los diversos contaminantes atmosféricos sobre los diferentes materiales que constituyen las colecciones en los museos son muy variados. Cada uno de los contaminantes presentes en estos entornos tiene sus efectos adversos para ciertos materiales, que pueden ser más o menos sensibles a su acción. Por ejemplo, en el caso de los metales, “el acero es sensible al dióxido de azufre (SO_2), el zinc a los compuestos orgánicos y al SO_2 , NO_2 y O_3 ; el cobre al SO_2 , H_2S , NO_2 y O_3 ” (Lafuente y Cano 2011). Por otro lado, el plomo es muy sensible a los ácidos orgánicos, especialmente al ácido acético (Tétreault 2003), al igual que el cobre (San Andrés *et al.* 2011, pp. 237- 260).

Por tanto, entre los efectos que provocan los contaminantes de origen exterior sobre los bienes culturales pueden encontrarse daños en numerosos materiales, bien sean de naturaleza orgánica o inorgánica. En primer lugar, los daños producidos por el **dióxido de azufre** pueden ser muy diversos. Basándose en Tétreault (2003) y Grzywacz (2006), Isabel García Fernández (2013, p. 226) expone que los estos daños producidos por los óxidos de azufre pueden derivar en la corrosión del cobre, algunas aleaciones de bronce, la plata o el aluminio. Además, afecta a tintes y provoca la decoloración de ciertos pigmentos o el oscurecimiento del pigmento blanco de plomo. De acuerdo con Tétreault (2003), los materiales que más sufren con el SO_2 son los derivados del carbonato cálcico, de la celulosa, la seda, y metales como el hierro o el acero. El SO_2 ataca a materiales calcáreos, como conchas o arcillas y a minerales. Además, este contaminante también afecta materiales como el pergamino o los cueros curtidos vegetalmente, provocando su debilitamiento, y como el caucho sintético y materiales textiles.

Por otro lado, el **dióxido de nitrógeno**, que puede provenir del exterior o ser emanado por ciertos materiales en el interior, presenta los mismos problemas que el dióxido de azufre, además de otros. Provoca decoloramiento de

pigmentos orgánicos y tintas, y puede contribuir a la degradación del papel y del cuero curtido vegetalmente. Dado que el NO_2 al disolverse en agua forma ácido nítrico, que constituye un ácido muy fuerte, puede actuar como agente oxidante responsable del deterioro consiguiente. Algunos de los deterioros provocados por el NO_2 son la corrosión de metales, hidrólisis de la celulosa, y ataque a piedras o superficies calcáreas (Thomson 1998, p. 149; Tétreault 2003). Además, este contaminante daña algunas fibras textiles como las de seda o lana (García Fernández 2013, p. 226).

Los soportes de nitrato de celulosa, usados como películas y negativos albergados en contenedores cerrados sin control medioambiental como se ha indicado, pueden emitir este compuesto y ocasionar graves problemas de conservación, también a otros materiales, por ejemplo celulósicos, en contacto o próximos a éstos (García Fernández 2013, pp. 216-217).

En cuanto a los daños producidos por el **ozono** sobre los materiales de las colecciones, existe evidencia en estudios realizados de que la decoloración producida en pigmentos de pinturas artísticas (también se ha observado en presencia de dióxido de nitrógeno, ácido nítrico o formaldehído) es directamente proporcional a la dosis recibida de este contaminante. En contraste con los efectos que provoca en materiales orgánicos, el O_3 por sí solo no afecta a materiales inorgánicos (tales como metales o piedra caliza, mármoles, etc.), pero en presencia de SO_2 acelera el proceso de corrosión (Velázquez de Castro González 2012, p. 25; Delgado Saborit 2004, pp. 62-65; Health- Canada and Environment-Canada 1999).

De acuerdo a Velázquez de Castro González (2012, p. 25), “la presencia de ozono puede provocar la degradación de polímeros naturales como el caucho, el algodón, la celulosa o el cuero junto a pinturas, elastómeros o plásticos”. Además, con el aumento de la humedad relativa del aire se intensifica la acción sobre los colorantes, produciendo su decoloración. Esta disminución de la intensidad de los colorantes es provocada por su exposición a altas

concentraciones de ozono. “Estos niveles pueden encontrarse fácilmente en el interior de museos y salas de arte, en donde las concentraciones resultan similares y, a veces, superiores a las registradas en el exterior” (Velázquez de Castro González 2012, p. 25). Además, provoca igualmente decoloración de tintes y pigmentos. De la misma manera, la presencia de O₃ afecta al cuero, el pergamino y las pieles, produce decoloración de fotografías, oxida la goma y produce el debilitamiento de textiles y material celulósico (García Fernández 2013, p. 227).

Parte de los daños que se atribuyen a los compuestos volátiles se deben a los compuestos orgánicos carbonilos, principalmente el **ácido acético y el formaldehído**, aunque se sospecha que el daño producido por el formaldehído se debe en realidad a su forma oxidada, el ácido fórmico, ya que, al igual que el ácido acético, provoca una aceleración en la corrosión de metales (García Fernández 2013, p. 222; Cano 2001; Grzywacz 2006, p. 101). “En líneas generales, la concentración de ácido fórmico suele ser mucho menor que la de acético, pero la degradación causada por ambos contaminantes es igual de considerable” (Grzywacz 2006, p. 3). El plomo es el material más sensible al ácido acético y generalmente se corroe en presencia de maderas ácidas o pinturas poco adecuadas utilizadas para la construcción de vitrinas de exhibición o de muebles para almacenamiento (Tétreault 2003). Los daños provocados por el ácido acético no solo se producen sobre el plomo, sino que afecta a otros metales tales como aleaciones de cobre, cadmio, magnesio o zinc. El CH₃COOH reacciona con esmaltes y cristales dañados, origina eflorescencias en cristal rico en sosa y favorece la polimerización de la celulosa (García Fernández 2013, p. 226; Tétreault 2003). Asimismo, este contaminante afecta a otros materiales, “provocando eflorescencias en calizas, fósiles ricos en calcio y cerámicas de baja cocción” (García Fernández 2013, p. 226).

En cuanto a los materiales que forman parte de las obras en museos que reaccionan con el formaldehído son: conchas, fósiles, minerales, cristales, vidrios y esmaltes. El HCHO debilita el cuero y la piel deteriorando el colágeno

y ataca a objetos que contienen gelatina. De la misma forma, este contaminante “decolora los tintes y colorantes y produce cambios químicos en pigmentos orgánicos” (García Fernández 2013, p. 224). Dicho contaminante produce también daños en materiales orgánicos, alterando las características de materiales celulósicos como el papel o textiles (García Fernández 2013, p. 224).

10. Límites de concentraciones de contaminantes atmosféricos recomendables en museos

Existen contaminantes que tienen un elevado riesgo sobre la salud de las personas, como sería el formaldehído, que ha sido reconocido como carcinógeno (Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo), por lo que es lógica la existencia de límites máximos de exposición a estos. Sin embargo, a pesar de que los daños causados sobre los objetos artísticos por contaminantes atmosféricos son irreversibles, para estos objetos no existen normas que contengan límites máximos para evitar su deterioro, a diferencia de lo que ocurre con las personas.

Si bien, algunos autores como Jean Tétreault o Cecily M. Grzywacz han tratado de establecer algunos valores límites para evitar que las obras sufran grandes deterioros (Tétreault 2003; Grzywacz 2006; ASHRAE 2007).

Tabla 4. Límites de concentraciones de contaminantes sugeridos para colecciones de bienes culturales basados en Grzywacz (2006) y ASHRAE (2007).

Principales contaminantes gaseosos encontrados en el interior de museos	Límites de contaminantes sugeridos para las colecciones ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	
	Materiales sensibles	Otros materiales
NO₂	< 0,09- 4,89	3,76-18,8
SO₂	< 0,11- 1,05	1,05- 5,26
O₃	< 0,098	0,98- 9,8
CH₃COOH	< 12,15	97,2- 680,4
HCHO	< 0,12- 6,15	12,3- 24,6

La sensibilidad de los materiales es determinada en función de su tipología y su susceptibilidad a ser deteriorado por el contaminante al que es expuesto. Al igual que los límites sugeridos para la concentración de los diferentes contaminantes que pueden ser encontrados en museos, la relación de “materiales sensibles” y “otros materiales” en función de su sensibilidad a los

diferentes contaminantes, expresados en la tabla anterior, queda reflejada en el Manual Monitoring for Gaseous Pollutants in Museum Environments escrito por Grzywacz (2006, pp. 97-105). Por ejemplo, en el caso de las piezas de la colección estable albergada en el centro c arte c, al estar compuesta por materiales textiles, serían especialmente sensibles a contaminantes inorgánicos como el SO_2 , el NO_2 y el O_3 , y a orgánicos como el HCHO .

11. Posibles medidas correctoras ante la presencia de contaminantes en los museos

Para evitar o reducir los efectos perniciosos de los contaminantes descritos sobre las obras en los museos se deberían adoptar tanto medidas de prevención como de control y corrección.

Como cita Mariano Seoáñez Calvo (2002, p. 733). “El mejor sistema para eliminar la contaminación atmosférica es evitarla o, por lo menos, tratarla en la fuente”.

Las acciones a acometer en caso de presencia de contaminantes en el entorno de nuestra sala o museo, bien sea en su exterior o en su interior, pueden variar según la fuente de emisión y las medidas de las que se dispone. Jean Tétreault (2003) propone diferentes pautas a seguir, ya sea evitar fuentes, bloquear infiltraciones o emisiones, filtrar los contaminantes, tomar medidas para reducir las posibles reacciones, disminuir el tiempo de exposición de la colección a estos o monitorear las emisiones y responder ante la presencia de concentraciones y daños. Dos de los tratamientos más comunes en interiores se tratan de la adsorción y la absorción de los contaminantes atmosféricos gaseosos (Seoáñez Calvo 2002).

Las estrategias de mitigación para controlar los contaminantes atmosféricos de origen exterior se pueden concentrar en tratar de disminuir la cantidad de estos que penetran en el interior, ya sea por medio de la filtración química en un sistema de aire acondicionado, o por medios pasivos, tales como el uso materiales absorbentes en el interior, que son usados para eliminar los vapores contaminantes, o incluso restringiendo la entrada de aire exterior (Camuffo *et al.* 2001; CCI 1993). Algunas de las acciones para acabar con la inclusión al interior del edificio de los contaminantes existentes el aire exterior restringiendo su entrada pueden reducirse en gran medida en mantener cerradas las

ventanas y las puertas. Además, estas aberturas al exterior deben quedar bien selladas (CCI 1993).

En cuanto a la contaminación de origen interior, esta puede ser controlada hasta cierto punto usando materiales recomendados para evitar la emisión de contaminantes gaseosos en el entorno de las obras de la colección (por ejemplo, pinturas estables en paredes, alfombras que no emiten gases nocivos) (CCI 1993). Los productos químicos, barnices, pinturas y agentes de limpieza, deben almacenarse en un espacio alejado del lugar de almacenamiento o exhibición de las piezas (CCI 1993).

No obstante en caso de encontrarse en el interior altas concentraciones de algunos de los contaminantes considerados se deberá emplear algún sistema de tratamiento que reduzca la concentración de estos contaminantes. Los métodos existentes son el lavado o absorción, la adsorción, la incineración y la oxidación catalítica. Teniendo en cuenta que el lavado se emplea para altas concentraciones de contaminantes (normalmente en los puntos de emisión de estos contaminantes), y que la combustión se emplea para gases que sean combustibles, se deberán utilizar equipos de adsorción, que tienen un buen rendimiento para bajas concentraciones de estos gases contaminantes y los generados en el interior (Thomson 1998, p. 155).

El tratamiento de adsorción usado en el interior de salas, como cita Mariano Seoáñez Calvo (2002, p. 738), “se trata de una transferencia de moléculas de una fase gaseosa a una fase sólida”. Este proceso puede ser de tipo físico (basado en las fuerzas de atracción existentes entre la superficie sólida y el adsorbente y las moléculas que son adsorbidas) o químico (se producen reacciones químicas en la superficie del adsorbente por las que se adsorbe más cantidad de gas o por las que se transforma en otros productos) (Seoáñez Calvo 2002, p. 738).

Habitualmente, se recurre a carbón activado como absorbente, en forma de tejido, pequeños fragmentos o cartones impregnados. Este compuesto es capaz de absorber los óxidos de nitrógeno que dan lugar a la rápida degradación autocatalítica del nitrato o de los metales adyacentes, por lo que su empleo resulta muy útil. Es conveniente sustituir cada cierto tiempo el carbón activado, ya que se satura con estos y otros compuestos volátiles que pueden existir en el aire. Teniendo en cuenta que el rendimiento de este tipo de adsorción es superior al 90% para los gases contaminantes exteriores (aunque en el caso del dióxido de nitrógeno se indica que la efectividad del carbón activo es variable), se considera que es la solución más interesante para la adecuación del ambiente interior de los museos (Thomson 1998, pp.153-155). Los carbones activos comerciales tienen como característica principal la gran superficie de contacto, del orden de 1.000 m²/g. Los filtros terminan colmatándose, aunque su duración suele ser alta y pueden regenerar, por lo que las láminas de carbón activos deben ser cambiadas cada cierto tiempo (Thomson 1998, p. 248).

Además del uso de carbón activado, se disponen de más posibilidades para eliminar los contaminantes gaseosos por adsorción, como los geles de alúmina o las zeolitas sintéticas entre otros (Seoáñez Calvo 2002, p. 739). Las ceolitas o zeolitas (silicatos hidratados de calcio y aluminio) se emplean para eliminar el óxido de nitrógeno y se utilizan igualmente con piezas elaboradas en acetato de celulosa (Shashoua, 2008, pp. 196-197).

En cuanto a la eliminación de COVs uno de los tratamientos posibles se trata de la absorción, que “es un sistema que se basa en la transferencia del gas contaminante, por diferencia de concentración, a una fase líquida absorbente, que después es sometida a una destilación o tratamiento biológico” (Seoáñez Calvo 2002, pp. 751-752).

Normalmente, se recomienda el empleo de estos adsorbentes o una buena ventilación para los objetos elaborados con plásticos semisintéticos o

sintéticos. Sin embargo, para el pvc plastificado (mediante ftalatos), estas medidas pueden acelerar la pérdida del plastificante y propiciar, por tanto, el deterioro del material (Shashoua, 2008, pp. 203-207).

Antes de usar las vitrinas de exposición se recomienda establecer tiempos de ventilación prolongados para evitar las altas concentraciones de contaminantes gaseosos en su interior. Además, se recomienda usar recubrimientos para el sellado de los paneles de madera, aunque algunos materiales de los recubrimientos usados para bloquear emisiones de productos emiten en general compuestos volátiles característicos y contribuyen por tanto a la contaminación del aire, por lo que es necesario asegurarse de que el material empleado es de calidad y no emite contaminantes. Además, debe considerarse que la composición de los revestimientos usados en la construcción de vitrinas es modificada con frecuencia, por tanto, no es recomendable el uso de materiales de revestimiento sin realizar análisis de emisiones de estos previamente (Schieweck y Salthammer 2011).

Uno de los revestimiento usados para impedir que los contaminantes gaseosos que emiten las maderas usadas en la construcción de los embalajes y vitrinas son las láminas aislantes como el Marvelseal®, el cual se trata de una lámina de polietileno aluminizado y nylon que hace de barrera, evitando así que penetren los vapores de agua y los gases contaminantes. Por tanto, como una de las medidas correctoras para reducir los posibles daños producidos por los contaminantes atmosféricos sobre las piezas de las colecciones puede ser el uso este tipo de material para forrar el interior de los contenedores.

12. Muestreo de los contaminantes atmosféricos en el Centro de Arte Complutense: Metodología aplicada

A fin de realizar de realizar la determinación de la existencia de contaminantes atmosféricos gaseosos en c arte c, se ha procedido al muestreo y análisis de los contaminantes NO₂, SO₂, O₃, HCHO y CH₃COOH tanto en su interior como en su exterior.

Adicionalmente, se han estudiado los datos de tres cabinas automáticas que ofrecen datos en continuo. Estos datos han sido comparados con los obtenidos mediante la colocación de tubos pasivos a fin de conocer las concentraciones de algunos de los contaminantes en el entorno del centro c arte c y poder conocer la relación entre los datos obtenidos por los diferentes mecanismos de medición y determinar si los correctores para la reducción o eliminación de contaminantes existentes cumplen su función. Para ello, se han colocado los tubos de muestreo pasivos de la marca *Radiello*® en diferentes puntos del entorno de c arte c (uno en el exterior de la sala, otro en la sala expositiva y uno en el interior de una vitrina).

Dos de las cabinas seleccionadas (Casa de Campo y Cuatro Caminos) pertenecientes a la Red de Cabinas Automáticas del Ayuntamiento de Madrid, aportan datos de los diferentes contaminantes a cada hora y son subidos a la web del Ayuntamiento. Para la recopilación de estos datos se han descargado los datos horarios de los días coincidentes a la fecha de exposición de los tubos pasivos. De la misma manera, se han descargado los datos diezminutales directamente de la cabina automática situada en la terraza del edificio del Instituto del Patrimonio Cultural de España (IPCE). No obstante, al tratarse estos últimos de datos diezminutales ha sido necesario seleccionar solo los horarios para poder comparar datos equitativos entre cabinas automáticas.



Figura 13. Cabina automática IPCE. © Isabel Sousa.

La cabina más cercana al Centro de Arte Complutense es la ubicada en la sede del IPCE (fig. 13); sin embargo por ampliar más el lugar de estudio y ver así como funcionan los diferentes contaminantes en una zona más extensa, es por lo que han sido seleccionadas las dos más cercanas de la red del Ayuntamiento, lo que puede resultar de interés para esta investigación, ya que están situadas en entornos muy diferentes.

En el siguiente mapa se puede observar la ubicación de cada uno de los puntos donde son medidas las concentraciones de contaminantes que han sido analizadas para este estudio:



Figura 14. Ubicación del Centro de Arte Complutense y las cabinas automáticas de Casa de Campo y Cuatro caminos (<http://www.mambiente.munimadrid.es/sica/scripts/index.php>).

- ◆ Cabina automática Casa de Campo
- ◆ Cabina automática Cuatro Caminos
- ◆ Cabina automática IPCE
- c arte c

Una vez recopilados los datos de las horas exactas coincidentes con el tiempo de exposición de los captadores pasivos, se han realizado medias totales para comparar los datos obtenidos, ya que de los tubos pasivos se obtienen datos de concentraciones medias obtenidas según el tiempo de exposición.

Como indican Dario Camuffo *et al.* en su artículo de investigación Environmental monitoring in four European museums, resultado de un estudio realizado mediante tubos pasivos en el Museo Correr en Venecia: “los contaminantes gaseosos de las afueras tienden a distribuirse homogéneamente en salas y galerías de interconexión y, por lo tanto, pueden caracterizarse adecuadamente por el uso de sólo unos pocos sitios de monitoreo dentro de un edificio” (Camuffo *et al.* 2001).

Por tanto, debido a la estructura espacial abierta de la superficie que compone el museo, a la homogeneidad en la dispersión en toda la sala de los materiales usados para la construcción de paneles y las pinturas y a la existencia de filtros de carbón activo en el sistema de climatización y renovación de aire, se ha considerado oportuno realizar, sencillamente, además de la medición exterior, una sola medición en la sala y una medición paralela de los mismos contaminantes en una de las vitrinas en las que se encuentra albergada una de las obras de la colección textil permanente. Las obras expuestas en la sala pertenecen a exposición temporal.

Los tubos pasivos *Radiello*® fueron ubicados en tres puntos del entorno de la sala de exposiciones: Uno en el exterior de esta (a unos 15 metros aproximadamente de la sala de exposición, reposado sobre el mobiliario de recubrimiento metálico de un extintor que cuelga en la pared) (Fig. 15, punto naranja en la zona exterior al edificio en el plano y fig. 16), otro en el centro del recorrido de la sala expositiva apoyado en la zona superior de una vitrina que se encuentra colgada en la pared, (Fig. 15, punto naranja en la zona azul del plano y fig. 17), y también en el interior de una vitrina que contiene una obra perteneciente a la colección estable, donde los tubos reposan sobre la misma

superficie que el objeto de la colección (fig. 15, punto naranja en la zona amarilla del plano y fig. 18).

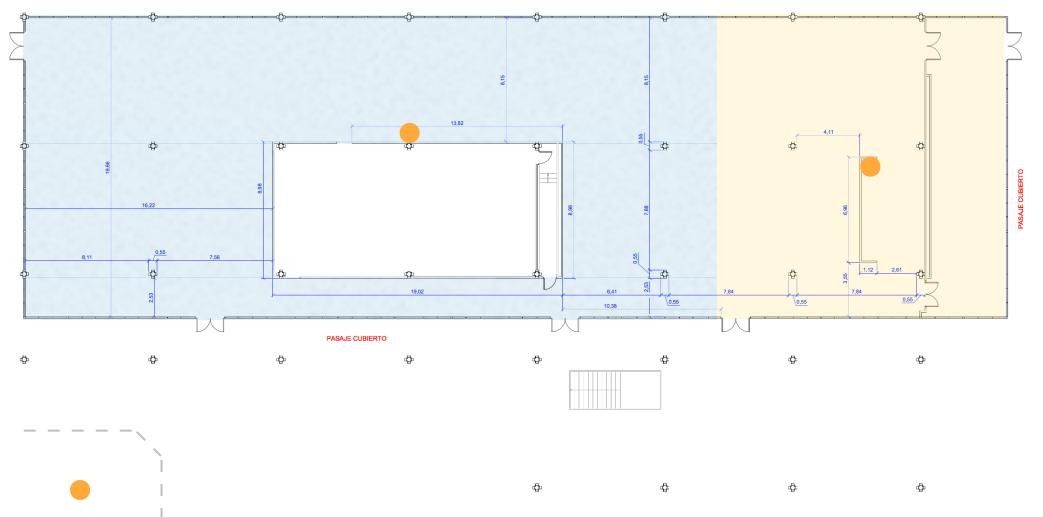


Figura 15. Plano de ubicación de los tubos pasivos. Centro de Arte Complutense.

El tiempo considerado oportuno para la exposición de los tubos ha sido 10 días (Tabla 5) de acuerdo a las consideraciones de los técnicos profesionales del Laboratorio y el Manual de uso de los tubos pasivos *Radiello*® (SIGMA-ALDRICH 2006).

Tabla 5. Tiempo de exposición de los tubos de muestreo.

TUBO		Contaminante medido	Fecha y hora instalación	Fecha y hora retirada	Tiempo de exposición en minutos
Interior. Exposición en sala.	1	NO ₂ y SO ₂	18/04/2017 11:35h	28/04/2017 10:51h	14356
	2	O ₃	18/04/2017 11:38h	28/04/2017 10:53h	14357
	3	Formaldehido	18/04/2017 11:41h	28/04/2017 10:55h	14354
	4	Ácido acético	18/04/2017 11:44h	28/04/2017 10:56h	14352

Tabla 5. Tiempo de exposición de los tubos de muestreo.

TUBO		Contaminante medido	Fecha y hora instalación	Fecha y hora retirada	Tiempo de exposición en minutos
Interior. Exposición en vitrina.	5	NO ₂ y SO ₂	18/04/2017 12:04h	28/04/2017 11:01h	14337
	6	O ₃	18/04/2017 12:05h	28/04/2017 11:02h	14337
	7	Formaldehído	18/04/2017 12:07h	28/04/2017 11:04h	14337
	8	Ácido acético	18/04/2017 12:10h	28/04/2017 11:06h	14336
Exterior	9	NO ₂ y SO ₂	18/04/2017 12:20h	28/04/2017 11:12h	14332
	10	O ₃	18/04/2017 12:22h	28/04/2017 11:14h	14332



Figura 16. Exposición de los tubos pasivos ubicados en el exterior del edificio. © Isabel Sousa.



Figura 17. Exposición de los tubos pasivos ubicados en la sala de exposición. © Isabel Sousa.



Figura 18. Exposición de los tubos pasivos ubicados en el interior de la vitrina. © Isabel Sousa.

13. Resultados y discusión

A continuación se presentan los datos obtenidos por las cabinas automáticas de la red de control de calidad del aire Ayuntamiento de Madrid ubicadas en Casa de Campo y Cuatro Caminos y la perteneciente al IPCE, durante el periodo del 18 de Abril de 2017 al 28 de Abril de 2017:

Cabinas automáticas ubicadas en Cuatro Caminos, Casa de Campo e IPCE. SO₂, (Fig. 19 y tabla 6), NO₂ (Fig. 20 y tabla 7) y O₃ (Fig. 21 y tabla 7):

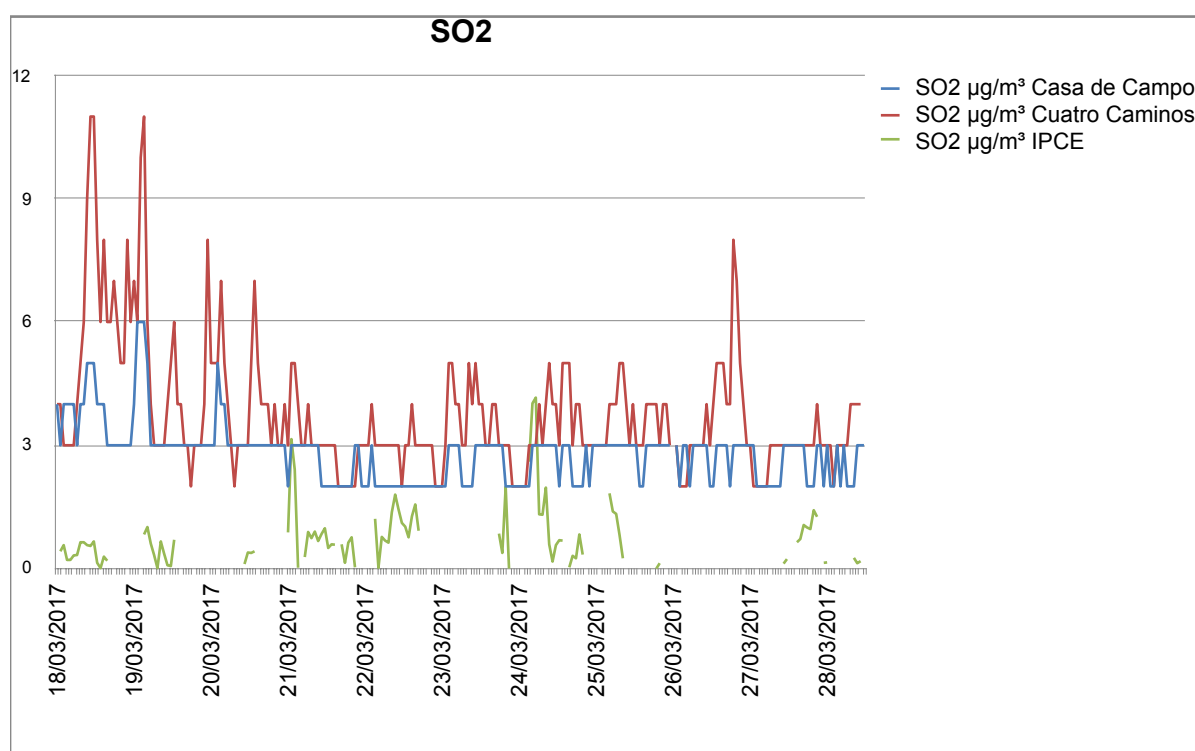


Figura 19. Gráfica de las concentraciones de SO₂. Casa de Campo, Cuatro Caminos y el IPCE.

Tabla 6. Concentraciones de SO₂.

18/04/17- 28/04/17	SO ₂ µg/m ³ Casa de Campo	SO ₂ µg/m ³ Cuatro Caminos	SO ₂ µg/m ³ IPCE
Min	2	2	0
Media	2,8	3,8	0,7
Máx	6	11	4,16

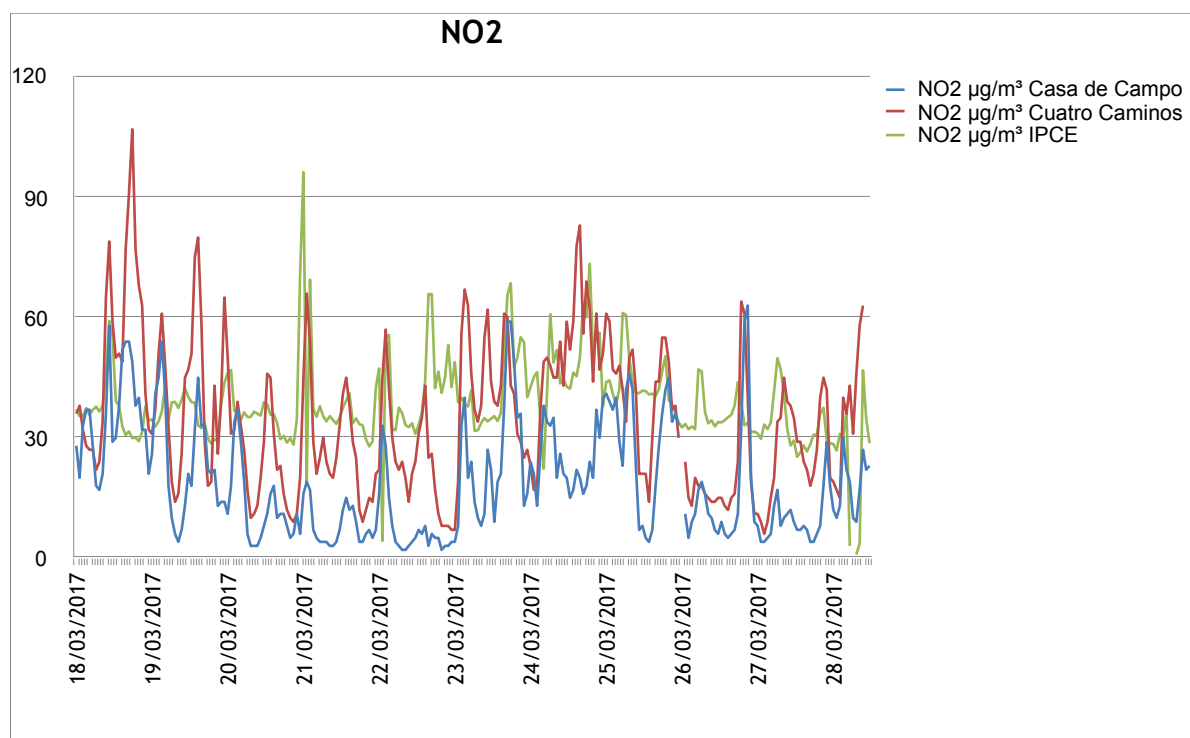


Figura 20. Gráfica de las concentraciones de NO₂. Casa de Campo, Cuatro Caminos y el IPCE.

Tabla 7. Concentraciones de NO₂.

18/04/17- 28/04/17	NO ₂ µg/m ³ Casa de Campo	NO ₂ µg/m ³ Cuatro Caminos	NO ₂ µg/m ³ IPCE
Min	2	6	0,82
Media	19,1	35,2	38,6
Máx	63	107	96,31

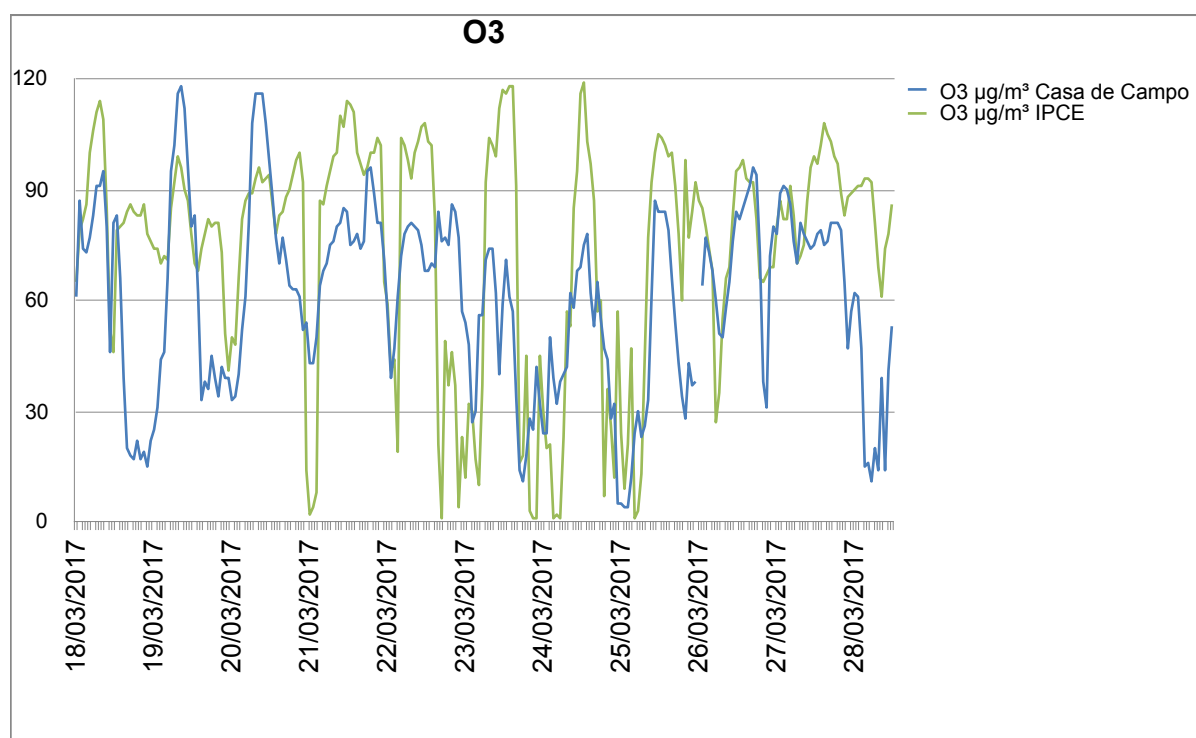


Figura 21. Gráfica de las concentraciones de O₃ en Casa de Campo y el IPCE.

Tabla 8. Concentraciones de O₃.

18/04/17- 28/04/17	O ₃ µg/m ³ Casa de Campo	O ₃ µg/m ³ IPCE
Min	4	1
Media	60,5	73,8
Máx	118	119

A continuación se presentan (Tabla 9) los datos obtenidos en los análisis de los tubos de captación pasiva durante el periodo del 18 de Abril de 2017 al 28 de Abril de 2017:

Tabla 9. Resultados de concentración encontrado en los tubos. Análisis IPROMA.

	TUBO	Contaminante medido	Límite de cuantificación	Resultados de concentraciones en tubos
Interior. Exposición en sala.	1	NO ₂	4,0 µg	15 µg
	1	SO ₂	4,0 µg	<4,0 µg
	2	O ₃	0,2 µg	2,8 µg
	3	HCHO	0,25 µg	40 µg
	4	CH ₃ COOH	0,05 µg	6 µg
Interior. Exposición en vitrina.	5	NO ₂	4,0 µg	<4,0 µg
	5	SO ₂	4,0 µg	<4,0 µg
	6	O ₃	0,2 µg	1,5 µg
	7	HCHO	0,25 µg	191 µg
	8	CH ₃ COOH	0,05 µg	17 µg
Exterior	9	NO ₂	4,0 µg	14 µg
	9	SO ₂	4,0 µg	<4,0 µg
	10	O ₃	0,2 µg	14 µg

Para realizar el cálculo de los resultados de la concentración de la contaminación existente en el ambiente interior de cada museo en función de la captada en cada tubo de medición es necesario tener en cuenta ciertos datos y la fórmula a aplicar:

La ecuación de cálculo es:

$$C (\mu\text{g}/\text{m}^3) = (\text{masa monitor } (\mu\text{g}) * 1000000) / (\text{SR en ml/min} * \text{Tiempo (min)})$$

Los SR (Samplig rate) de los tubos pasivos en ml/minuto son para cada contaminante medido:

- Ácido acético: 26
- NO₂: 78
- SO₂: 119
- Ozono: 24.6
- Formaldehído: 99

A continuación se presentan (Tabla 10) los resultados de las concentraciones de contaminantes atmosféricos en los tres puntos de muestreos mediante los tubos pasivos durante el periodo del 18 de Abril de 2017 al 28 de Abril de 2017:

Tabla 10. Resultados de la concentración de contaminantes en ambiente. Análisis IPROMA.

TUBO	Contaminante medido	Concentración en tubos (μg)	Tiempo de exposición (min)	SR ml/min	Concentración ambiente (μg/m ³)
Interior. Exposición en sala.	1 NO ₂	15	14356	78	13,39
	1 SO ₂	-	14356	119	-
	2 O ₃	2,8	14357	24,6	7,92
	3 HCHO	40	14354	99	28,15
	4 CH ₃ COOH	6	14352	26	16,07
Interior. Exposición en vitrina.	5 NO ₂	-	14337	78	-
	5 SO ₂	-	14337	119	-
	6 O ₃	1,5	14337	24,6	4,25
	7 HCHO	191	14337	99	134,57
	8 CH ₃ COOH	17	14336	26	45,60
Exterior	9 NO ₂	14	14332	78	12,52
	9 SO ₂	-	14332	119	-
	10 O ₃	14	14332	24,6	39,70

En las gráficas y tablas elaboradas a partir de los datos de las concentraciones de contaminantes muestreados por las cabinas de Casa de Campo, Cuatro Caminos y del IPCE, puede observarse que para el SO_2 y el NO_2 los niveles encontrados en Casa de Campo se mantienen más bajos que los de Cuatro Caminos, lo que puede deberse al entorno menos contaminado en que se encuentra la primera, al situarse en un lugar apartado del tráfico y rodeado de vegetación. Por el contrario el entorno en que se encuentra ubicada la cabina de Cuatro Caminos se trata de un lugar más próximo al centro de la ciudad, donde las fuentes de emisión de los contaminantes son más abundantes. Por otro lado, los niveles de SO_2 medidos por la cabina del IPCE marcan unos niveles generales más bajos para el SO_2 respecto a Casa de Campo y Cuatro Caminos y unos niveles más altos tanto de NO_2 (respecto a Casa de Campo y Cuatro Caminos) como de O_3 (respecto a Casa de Campo). Los niveles más elevados en este entorno para el NO_2 pueden deberse a su proximidad a la M30. Sin embargo, los niveles más elevados de O_3 , se pueden deber a la cantidad de radiación recibida, la dirección de los vientos, a las sustancias existentes que reaccionan con este para formar un nuevo compuesto o bien a la cantidad de contaminante primario precursor del ozono.

No obstante, a pesar de encontrar diferentes niveles de concentraciones en el entorno de las tres cabinas, sí se puede observar en todas como coinciden las curvas de aumento y disminución en las fluctuaciones producidas para los diferentes contaminantes. Además, de las anteriores gráficas se deduce la existencia de los contaminantes medidos en el ambiente de Madrid, y en concreto en el entorno del centro c arte c, y en ciertos casos con concentraciones muy elevadas.

El hecho de que la concentración de NO_2 sea mucho más baja en el exterior de la sala c arte c respecto a los niveles de concentración obtenidos por las cabinas automáticas puede deberse a diversos factores. Con respecto a la cabina más cercana (IPCE) los valores hallados pueden deberse a una cierta lejanía de c arte c de la M30 (principal fuente cercana de emisión para este

contaminante debido al elevado flujo de tráfico rodado). Por otro lado, hay que resaltar que el Centro de Arte Complutense se encuentra rodeado de vegetación, lo que supone una barrera para los contaminantes, mientras que la cabina del IPCE se encuentra ubicada en la terraza superior del edificio, donde queda expuesta a los contaminantes sin ningún tipo de barrera intermedia.

Tabla 11. Comparación de las concentraciones sugeridas con los resultados obtenidos.

Principales contaminantes gaseosos encontrados en el interior de museos	Límites de contaminantes sugeridos para las colecciones ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		Resultados del muestreo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	
	Materiales sensibles	Colección general	Sala	Vitrina
NO₂	< 0,09- 4,89	3,76-18,8	13,39	-
SO₂	< 0,11- 1,05	1,05- 5,26	-	-
O₃	< 0,098	0,98- 9,8	7,92	4,25
CH₃COOH	< 12,15	97,2- 680,4	16,07	45,60
HCHO	< 0,12- 6,15	12,3- 24,6	28,15	134,57

Como puede observarse en la tabla anterior, (que recoge la comparación entre los valores establecidos como sugeridos en función de su afección y los resultados obtenidos tanto en la sala como en la vitrina), para el SO₂ (sala y vitrina) y el NO₂ (en el interior de la vitrina), a pesar de no haberse obtenido valores porque la concentración existente está por debajo del límite de detección, se podría incluso superar el valor sugerido para los materiales sensibles, ya que el límite de detección en los tubos para este contaminantes es <4 μg en muestra, valor que supera los límites sugeridos para los materiales sensibles.

Por otro lado, en cuanto a los límites establecidos para la colección general, solo son superados por el formaldehído (que tiene como límite sugerido una concentración hasta 24,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y la concentración maestreada en la sala ha sido de 28,15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

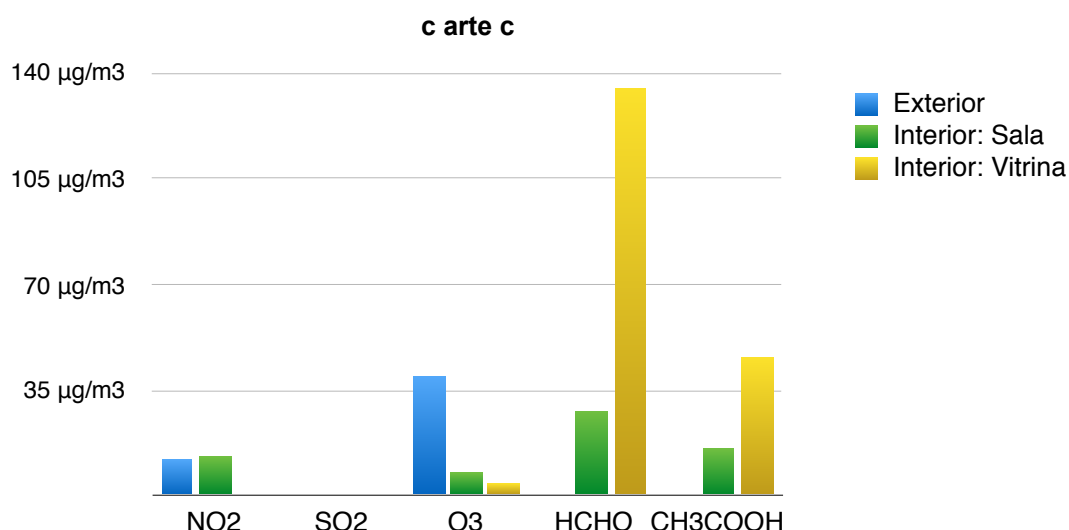


Figura 22. Comparación de las concentraciones de contaminantes. Muestreo mediante tubos de difusión pasiva.

Como se puede observar en la gráfica anterior, respecto a cómo funciona tanto el edificio y los contenedores de exposición y almacenamiento como barrera para los diferentes contaminantes, se observa como el SO₂ siempre permanece en concentraciones menores al límite de detección, el O₃ 39,70 µg/m³ en el exterior, 7,92 µg/m³ en sala y 4,25 µg/m³ en la vitrina.

La concentración de NO₂ en la vitrina no se conoce, dado que no superaba el límite de detección; sin embargo, los valores de la sala permanecen prácticamente igual que en el exterior, siendo los de sala incluso más elevados (13,39 µg/m³ en interior de la sala y 12,52 µg/m³ en el exterior). Esto puede significar una falta de renovación del aire del interior de la sala de exposiciones, una proximidad de la entrada de aire a una fuente de emisión de gases originados por la combustión de calefacciones propias del centro c arte c o un mal funcionamiento de los filtros instalados para este contaminante.

Los contaminantes de origen orgánico, a diferencia de los inorgánicos procedentes del exterior son, como ya se ha indicado, originados principalmente en el interior del edificio y sobre todo por los materiales usados en la construcción de muebles de almacenamiento y vitrinas, lo que en general da lugar a concentraciones mayores en su interior. Esto queda reflejado en los

resultados de las concentraciones obtenidas en los muestreos en sala y vitrina tanto de CH_3COOH ($16,07 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en la sala y $45,60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en la vitrina) y HCHO ($28,15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en la sala y $134,57 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en vitrina). El nivel de concentración de formaldehído en el interior de la vitrina es más de cuatro veces mayor a la concentración existente en la sala.

14. Efectos de los contaminantes sobre los bienes de la colección textil de la Universidad Complutense de Madrid.

Dada la existencia de concentraciones de contaminantes atmosféricos en el interior de la sala de exposiciones c arte c y la amplia variedad de materiales que conforman la colección textil perteneciente de la Universidad Complutense de Madrid que es albergada en esta, se trata de exponer a continuación los daños generales más importantes que se pueden producir sobre los materiales textiles por su exposición a los contaminantes atmosféricos anteriormente nombrados:

Como se ha expuesto anteriormente en el apartado 9 “Efecto de los contaminantes atmosféricos”, todos los contaminantes que han sido muestreados en el centro c arte c tienen efecto, en mayor o menor medida, sobre los materiales que componen la colección textil. Bien sea atacando a las fibras textiles, bien a otros elementos que contienen las piezas, como son los metales que constituyen los abalorios decorativos o los hilos metálicos.

El O₃ afectará a todas las piezas de la colección, ya que puede tener un carácter oxidante sobre las fibras (Sanz, E. 2015, p. 145), las cuales se presentan de diversa tipología en la colección. “Los tejidos que se ven más afectados por el ozono son las fibras de celulosa tales como algodones y sedas” (Delgado Saborit 2004, p. 65). De la misma manera, aunque con intensidad decreciente, son atacadas por este contaminantes las fibras de poliéster, nylon, acetatos y algodón (Seoáñez Calvo 2002, p. 394). Dado esto, los materiales textiles de la colección que se ven perjudicados por su exposición a este contaminante podrían mostrar una reducción de la resistencia a la tracción y otras de sus propiedades físicas (Delgado Saborit 2004, p. 65). Además, la presencia de este contaminante puede producir la decoloración de los tintes que presentan ciertas piezas del conjunto.

Como cita Estrella Sanz (2015, pp. 144) en su Tesis Doctoral titulada Colecciones textiles en museos militares: Tipología y problemática de conservación y restauración, “los contaminantes sulfurosos pueden tener un efecto deshidratante sobre los tejidos” por lo que estos contaminante podrían estar causando graves deterioros sobre toda la colección, siendo los tejidos de mayor contenido en lignina los que absorban en mayor grado el SO_2 . “Los SO_x atacan a muchas fibras textiles naturales y sintéticas, como la lana, el algodón y el nylon” (Seoáñez Calvo 2002, p. 394).

Según Seoáñez Calvo (2002, p. 394), el ataque del contaminante “es más intenso si las fibras son finas. En principio, las fibras textiles se hacen más frágiles, pues baja la tensión de ruptura, y en algún caso se colorean”, por lo que en función del tamaño de fibra que constituyan unas piezas u otras (o partes de estas), estas resultarán más débiles o menos ante su exposición a los contaminantes atmosféricos.

En cuanto a la afección que podría tener la presencia de SO_2 sobre los elementos metálicos, los más vulnerables serían los constituidos por plata, bronce, cobre o aluminio, ya que podría provocarse la corrosión de estos.

De los compuestos nitrogenados será el NO_2 el que más afecte a los bienes culturales textiles (Sanz, E. 2015, p. 145). Este contaminante, de forma similar al resto de los aquí nombrados, afectaría a piezas de la colección textil, entre las que podrían verse afectadas las compuestas por fibras de seda o lana. También se podría producir la decoloración de las fibras teñidas en distintos tejidos por la presencia del NO_2 . Dado esto, se podría deducir que es prácticamente toda la colección la que puede quedar dañada por dicho contaminante. Respecto a los materiales metálicos de plata, cobre y zinc, la presencia del NO_2 podría propiciar la aceleración de su corrosión en caso de existir la presencia de sulfuro de hidrógeno en el ambiente en que se encuentra expuesta la colección.

De acuerdo con Mariano Seoáñez Calvo (2002, p. 394), “los tintes son generalmente sensibles a los oxidantes y sobretodo al O_3 y a los NO_x ”, ya que estos tintes podrían perder color de manera más acentuada si quedan expuestos a estos contaminantes. El ozono debilita los textiles y otros materiales celulósicos, por tanto, la presencia de este en el entorno de c arte c también podría provocar deterioros en gran parte de la colección.

Además de estos, como ya se ha citado anteriormente, tanto el ácido acético como el formaldehído provocan daños sobre los materiales constituyentes de las piezas de la colección. El formaldehído podría reaccionar con las fibras textiles alterando sus características (García Fernández 2013, p. 224). De la misma manera, la presencia de ácido acético podría favorecer deterioros producidos en materiales celulósicos. Ambos contaminantes podrían actuar sobre otros materiales que componen la piezas ya que, al igual que los otros contaminantes ya nombrados, afectan a ciertos metales provocando su corrosión (plata, cobre o zinc, entre otros) (García Fernández 2013, p. 226).

Como consecuencia a lo anterior, se deduce que los materiales que componen las piezas de esta colección podrían estar en riesgo de sufrir deterioros al encontrarse expuestos a los contaminantes ya citados. En general el material predominante en las piezas se trata de textil, el cual podría verse dañado siempre por algunos de los contaminantes o varios en función de la fibra que constituye el tejido. El metal se encuentra también presente en muchas de las obras, ya sea en chapería, otros elementos decorativos o en hilos entorchados, que como ya se ha visto se componen de materiales como plata, zinc o cobre, que pueden ser muy sensibles ante algunos de los contaminantes.

15. Conclusiones

Tras analizar los niveles de concentración de contaminantes existentes en el Centro de Arte Complutense, se han extraído las siguientes conclusiones:

- Por una parte, se ha determinado que la contaminación es un hecho e incluso en el caso de la cantidad de concentración de formaldehído en el interior de la vitrina muestreado puede suponer un riesgo evidente de deterioro sobre la pieza textil expuesta en ella.
- Por tanto, existe la necesidad de realizar actuaciones que ayuden a mitigar las concentraciones elevadas, ya que al igual que la pieza de esa vitrina, las demás piezas de la colección estable conservadas en condiciones prácticamente iguales pueden correr el mismo riesgo.
- Una solución podría ser la colocación en el interior de los mobiliarios de almacenamiento y exposición de captadores de carbón activo para este contaminante o en caso de no disponer de medios para adquirir estos filtros, sería recomendable la apertura de estos contenedores periódicamente para impedir que el aire con elevadas concentraciones quede estancado en cierto modo en el interior y así permitir la renovación de este.
- En cuanto a los niveles de concentración de formaldehído en la sala, a pesar de no suponer un riesgo inminente para la colección, también al no tratarse de una sala de exposiciones permanentes (por lo que las obras están expuestas al contaminantes por un periodo limitado de tiempo) se aconseja que se actúe para disminuir y prevenir un aumento de este, sobre todo cuando existen cambios en las exposiciones temporales y se usan nuevos materiales y productos que puedan propiciar a un aumento de este contaminante. Además, es importante su reducción, ya que presenta efectos cancerígenos para las personas.

- Respecto al ácido acético, el cual puede afectar tanto a la conservación de textiles, así como sobre los elementos metálicos que están presentes en ellas, si no se realiza un control periódico y tratan de ejecutar actuaciones para la disminución de las concentraciones encontradas en el interior de la vitrina también podría suponer un posible daño para los objetos de la colección.
- La presencia de estos dos contaminantes en el interior de la vitrina podría ser debida a los materiales de construcción de la vitrina, los usados en caso de haberse tratado la obra, o incluso a los materiales que la componen. Por ello, para ambos contaminantes, además de tratar de colocar filtros para su disminución, como ya se ha indicado anteriormente, es aconsejable permitir la circulación y renovación del aire interior abriendo periódicamente la vitrina. Además, tras efectuar las correspondientes medidas para la reducción de estos, se aconseja realizar nuevos muestreos periódicos para el control y para verificar la efectividad de las acciones de prevención.
- De los contaminantes inorgánicos de origen exterior analizados se ha observado que, para el ambiente interior, el NO₂ es el contaminante que permanece con valores similares al exterior, lo que indica que sería necesario revisar los filtros, ya que se ha constatado la existencia de este en el sistema de climatización del museo.

Finalmente, se concluye con la necesidad de realizar mediciones de los contaminantes atmosféricos en el interior de museos, salas de exposición, almacenes y archivos y bibliotecas donde son albergados bienes culturales, como método de prevención para la conservación del patrimonio cultural.

16. Bibliografía

ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers), 2007. ASHRAE Handbook: Heating, Ventilating, and Air-conditioning Applications.

AUSSET, P. y LOMBARDO, T. 2006, "Analytical methods to study atmospheric pollutants and weathering at materials of Cultural Heritage". En: Lefèvre (eds). *The materials of cultural heritage in their environment*. Ed: Edipuglia, pp. 105-117.

AYUNTAMIENTO DE MADRID, 2016. Protocolo NO₂. Disponible en: http://www.mambiente.munimadrid.es/opencms/export/sites/default/calair/Anexos/Protocolo_NO2.pdf [Consulta: 3.05.2017]

BRIMBLECOMBE, P. "The Effects Of Air Pollution On The Bluit". Air Pollutions Reviews Vol. 2. Recuperado de: <https://archive.org/details/PeterBrimblecombeTheEffectsOfAirPollutionOnTheBluit> [Consulta: 23.02.2017]

BLADES, N., ORESZCZYN, T., BORDASS, W. y CASSAR, M. 2000., "Guidelines on pollution control in heritage buildings". London. Disponible en: <http://discovery.ucl.ac.uk/2443/1/2443.pdf> [Consulta: 27.02.2017]

BRADLEY, S. y THICKETT, D. 1999., "The pollution problem in perspective". *ICOM Committee for Conservation preprints*. 12th Triennial Meeting, Lyon. *James and James Science (Londres)*, pp. 8-13.

CAMUFFO, D., R. VAN GRIEKEN, H.-J. BUSSE, G. STURARO, A. VALENTINO, A. BERNARDI, N. BLADES, D. SHOOTER, K. GYSELS, F. DEUTSCH, M. WIESER, O. KIM, y U. ULRICH. 2001, "Environmental monitoring in four European museums". *Atmospheric Environment* 35, Suppl. 1: S127–S140.

CANO DÍAZ, E., 2001. *Efecto de los vapores de los ácidos acético y fórmico en la degradación y patinado del cobre*. Tesis Doctoral: Universidad Complutense de Madrid.

CARDELL, C., UROSEVIC, M., SEBASTIÁN-PARDO, E., HOREMANS, B., KONTOZOVA-DEUTSCH, V., POTGIETER-VERMAAK, S., BENCS, L., ANAF, K.W., DE WAELE, K. y VAN-GRIEKEN, R. 2013., "Risks of atmospheric aerosol for cultural heritage assets in Granada (Spain)". *Science and Technology for the Conservation of Cultural Heritage – Rogerio-Candelera, Lazzari & Cano (eds) ©Taylor & Francis Group, London*, pp. 45-49.

CARPENTER, J. M., AND HATCHFIELD, P. B., 1987. *Formaldehyde: How great is the danger to museum collections?*. Cambridge, Mass.: Center for Conservation and Technical Studies, Harvard University Art Museums.

CASS, ROWAN, G, JAMES R. DRUZIK, GROSJEAN, D., NAZAROFF, W.W., WHITMORE, P.M., Y WITTMAN, C.L., 1989. *Protection of Works of Art from Atmospheric Ozone*. Research in Conservation 5. Marina del Rey, CA: Getty Conservation Institute. Disponible en: http://hdl.handle.net/10020/gci_pubs/protection_atmospheric_ozone [Consulta: 25.04.2017]

DELGADO SABORIT, J.M., 2004. *Validación e implementación de técnicas de captación pasiva para el estudio de los niveles y efectos de ozono troposférico y dióxido de nitrógeno en un área costera mediterránea*. Efectos del Ozono y NO₂. Tesis Doctoral: Universitat Jaume I. pp. 62-65.

FERNANDEZ PATIER, R., 2007. "Metodología de evaluación de la calidad del aire". Real Academia Nacional de Farmacia. Monografías XXII. Contaminación y Salud. Disponible en: <http://www.analesranf.com/index.php/mono/article/view/606/623> [Consulta: 06.06.2017]

GALLEGO PICÓ, A. et al., 2012. *Contaminación atmosférica*. Universidad Nacional de Educación a distancia. Madrid.

GARCÍA FERNANDEZ, I., 2013. *La conservación preventiva de bienes culturales*. Alianza Editorial. Madrid.

GONZÁLEZ MENA, M. A., 1994. *Colección Pedagógico Textil de la Universidad Complutense de Madrid*. Catalogo. Consejo Social de la Universidad Complutense de Madrid.

GRZYWACZ, C. M., 2006. *Monitoring for Gaseous Pollutants in Museum Environments*. Tools for Conservation. Los Angeles, CA: Getty Conservation Institute.

HATCHFLIED, P.B. CARPENTER, J.M., 1986. "The problem of Formaldehyde in Museum Collections". *The international Journal of museum Management and Curatorship*. Vol 5, Issue 2., pp 183-188

HEALTH & ENVIRONMENT CANADA, 1999. National ambient air quality objectives for ground-level ozone.

HERRÁEZ J. A., ENRÍQUEZ DE SALAMANCA G., PASTOR ARENAS M.J. Y GIL MUÑOZ T., 2014. *Manual de seguimiento y análisis de condiciones ambientales*. Ministerio de Educación, Cultura y Deporte. Madrid, p. 37.

IAQ, 2014. Book of Abstracts. p.56-57.

KRUPIŃSKA, B. *et al.*, 2012. "Assessment of the air quality (NO₂, SO₂, O₃ and particulate matter) in the Plantin-Moretus Museum/Print Room in Antwerp, Belgium, in different seasons of the year". *Microchemical Journal* 102, pp 49-53.

KRUPIŃSKA, B., VAN GRIEKEN, R., DE Wael, K., 2013. "Air quality monitoring in a museum for preventive conservation: Results of a three-year study in the Plantin-Moretus Museum in Antwerp, Belgium". *Microchemical Journal* 110, pp 350-360

LAFUENTE, D., CANO, E. & MARTÍN, E., 2013. "Indoor pollution and metal corrosion by organic acids: Case study of the Oteiza Museum (Spain)". *Science and Technology for the Conservation of Cultural Heritage-Rogerio-Candelera, Lazzari & Cano (eds) ©Taylor & Francis Group, London*, pp. 99-102.

LAFUENTE, D. CANO, E., 2011. "El uso de probetas metálicas para la evaluación de la corrosividad en museos españoles". *XVIII Congreso Internacional de Conservación y Restauración de BBCC*. Granada 2011, pp. 380-3.

LAFUENTE, D., 2011. "Conservación preventiva del patrimonio cultural metálico en museos. Estudio de la presencia de ácidos orgánicos mediante captadores pasivos: la aplicación de técnicas de análisis". *Estrat Crític* 5. Vol.3, pp. 69-81

LANKESTER, P., 2016. "Pollution measurement- designing representative measurements and interpreting the results". *IAQ. Heritage Research to Conservation Practice. Indoor Air Quality in heritage and historic environments. 12th International Conference*. Birmingham, Thinktank.

LARKA ABELLÁN, M-B. *et al.* *El ozono troposférico y sus efectos en la vegetación*. Ministerio de medio ambiente, y medio rural y marino, 2009. Disponible en: http://www.mapama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/Ozono_tcm7-438816.pdf

MARM, 2011. *Inventarios Nacionales de Emisiones a la Atmósfera 1990-2009*. Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino.

MAROTO, P., 2016. El papel de los materiales de construcción en la calidad del aire interior. En: *Guía de calidad del aire interior: Comunidad de Madrid* 2016, pp. 31-32. Disponible en: <http://www.madrid.org/bvirtual/BVCM015715.pdf> [Consulta: 6.08.2017]

MORALES I.M., BLANCO ACEVEDO, V. y GARCÍA NIETO, A., 2010. *Calidad de aire interior en edificios de uso público*. Edita: Dirección General de Ordenación e Inspección. Consejería de Sanidad de la Comunidad de Madrid. Madrid.

PREUSSER, F&DRUZIK, J. R., 1989. "Environmental Research at the Getty Conservation Institute". *Restaurator. International Journal for the Preservation of Library and Archival Material*. 10(3-4). Copenhagen, pp. 160-196.

QUEROL *et al.*, 2012. "Bases científico-técnicas para un plan nacional de mejora de la calidad del aire". En: Querol, X., Mar, V., Teresa, M., Alastuey, A. (Eds). *Editorial: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). Madrid*. p. 20

RUBIO GONZÁLEZ, C., 2015. "Técnicas y materiales de los hilos entorchados de la colección inaugural del 1882 del museo histórico dominico". *Conserva* 20, 2015. pp. 71-85.

SAN ANDRÉS, M., DE LA ROJA, J.M., SANTOS, S., SANCHO, N., 2011. "Patrones de identificación del verdigrís. Elaboración a partir de la reproducción de recetas antiguas". En: Ministerio de Cultura, Educación y Deporte, 2012. *Fatto d'Arquimia. Historia e identificación de pigmentos artificiales en las técnicas pictóricas*. pp. 237- 260. Secretaría General Técnica. Subdirección General de Publicaciones, Información y Documentación. Madrid.

SÁNCHEZ, B., VILLANOVA, O., CANELA, M.C. & GOMEZ, T., 2015. Boletín del Museo Arqueológico Nacional 33/2015, *Madrid*, pp. 367-381.

SÁNCHEZ DE LEÓN LINARES, L. J. 2016. "Cómo medir la calidad del aire interior". En: Guía de calidad del aire interior: Comunidad de Madrid 2016. p.73 Disponible en: <http://www.madrid.org/bvirtual/BVCM015715.pdf>

SANTOS BLANCO, J. P., 2002. *Análisis y modelos de los mecanismos de detección de gases contaminantes urbanos con sensores de estado sólido*. Tesis doctoral: Universidad Complutense de Madrid.

SANZ, E. 2010. *Colecciones textiles en museos militares: Tipología y problemática de conservación y restauración*. Tesis Doctoral: Universidad Complutense de Madrid.

SCHIEWECK, A., Y SALTHAMMER, T., 2011. "Indoor airquality in passive-type museum showcases". *Journal of Cultural Heritage* 12. pp. 205-213

SEISDEDOS RIBERA, A., 2015. *Propuesta de Conservación-Restauración: Colección de dengues en el Museo Pedagógico Textil*. Trabajo Fin de Grado. Universidad Complutense de Madrid.

SEOÁNEZ CALVO, M., 2002. *Tratado de la contaminación atmosférica: problemas, tratamiento y gestión*. Ed: Mundi- Prensa.

SHASHOUA, Y., 2008. *Conservation of plastics. Materials science, degradation and preservation*, Oxford: Elsevier.

SIGMA-ALDRICH, 2006. Fondazione Salvatore Maugeri. *Radiello®. Diffusive Sampling System*.

STANIFORTH, S., 2013. "Historical Perspectives on Preventive Conservation". *Readings in Conservation Series. The Getty Conservation Institute, Los Angeles, California*.

TÉTREAU, J., 2003. *Airborne pollutants in museums, galleries, and archives: risk assessment, control strategies, and preservation management*. Ottawa: Canadian Conservation Institute.

THOMSON, G., 1998. *El museo y su entorno*. Ediciones AKAL, Madrid.

VELÁZQUEZ DE CASTRO GONZÁLEZ, F., 2012. *La contaminación en España: los efectos del ozono y del cambio climático*. Editorial ECU

WATT, J. et al., 2009. *The Effects of Air Pollution on Cultural Heritage*. Editorial Springer.

WHO (World Health Organization), 2005. *Air Quality Guidelines: Global Update 2005*. Disponible en: <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=7VbxUdIJE8wC&oi=fnd&pg=PR9&dq=atmospheric+pollutants+sulfur+dioxide&ots=w1a2rSN6ua&sig=BRkbnzfKIITg4JvmNY0CmIO-Lso#v=onepage&q=atmospheric%20pollutants%20sulfur%20dioxide&f=false> [Consulta: 3.04.2017]

ENLACES WEB:

Ayuntamiento de Madrid, 2015. www.mambiente.munimadrid.es [Consulta: 12.04.2017].

Carbotecnica, 2017. Disponible en: <https://www.carbotecnica.info/encyclopedia/granulometria/> [Consulta 16.06.2017]

CCI (Canadian Conservation Institute), 1993. Environmental and Display Guidelines for Paintings. Disponible en: <http://canada.pch.gc.ca/eng/1439925170465> [Consulta: 29.02.2017]

Comunidad de Madrid. Disponible en: http://gestionamadrid.org/azul_internet/html/web/6.htm?ESTADO_MENU=6 [Consulta: 12.03.2017]

EEA (European Environment Agency), 2014. *Fuentes de contaminación atmosférica en Europa*. Disponible en: <https://www.eea.europa.eu/es/senales/senales-2013/infografia/fuentes-de-contaminacion-atmosferica-en-europa-2/view> [Consulta: 29.05.2017]

Instituto Nacional de Ecología, 2010. Manual 1. *Principios de la medición de la Calidad del aire, México*. Disponible en: <http://sinaica.inecc.gob.mx/archivo/guias/1-%20Principios%20de%20Medición%20de%20la%20Calidad%20del%20Aire.pdf> [Consulta 03.06.2017]

Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. Disponible en: <http://www.insht.es/portal/site/Insht/menuitem.1f1a3bc79ab34c578c2e8884060961ca/?vgnextoid=f7cf66174a187410VgnVCM1000008130110aRCRD&vgnnextchannel=ac18b12ff8d81110VgnVCM100000dc0ca8c0RCRD> [Consulta 03.08.2017]

MEMORI PROJECT. Disponible en: <http://www.memori.fraunhofer.de/334.html>. [Consulta 28.05.2017]

Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente. Disponible en: http://www.mapama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/emisiones/prob-amb/gases_precursores_ozono.aspx [Consulta 3.08.2017]

The Getty Conservation Institute. *Past Projects: Pollutants in the Museum Environment (1985- 1998)*. *The J. Paul Getty Trust*. Disponible en de: http://www.getty.edu/conservation/our_projects/science/pollutants/index.html [Consulta: 24.02.2017]

ANEXOS

Anexo I.

Análisis de las muestras.

Anexo I. Análisis de las muestras:

Análisis de muestras realizados por el Laboratorio Iproma para cada contaminante medido por los diferentes tubos pasivos:

- NO₂ y SO₂. Dióxido de nitrógeno y dióxido de azufre:

- Cuerpo difusivo azul, código RAD1201
- Cartucho adsorbente código RAD166

El código de cartucho RAD166 está hecho de polietileno microporoso recubierto con trietanolamina (TEA). El nitrógeno (NO₂) y el dióxido de azufre (SO₂) son chemiadsorbidos sobre TEA como nitrito y sulfuro o iones sulfato respectivamente. El nitrito se cuantifica mediante espectrofotometría visible, mientras que sulfito y sulfato se analizan por cromatografía iónica (NO₂ y SO₂ se pueden analizar juntos mediante cromatografía iónica).

El muestreo es selectivo para las moléculas gaseosas: cualquier nitrito, sulfito o sulfato en el aire no atraviesa la membrana difusora.

- O₃. Ozono:

- Cuerpo difusivo azul código RAD1201
- Cartucho adsorbente código RAD172

El cartucho de código RAD172 está formado por un tubo de polietileno microporoso relleno con gel de sílice recubierto con 4,4'-dipiridiletieno y cerrado, en un extremo, por una tapa de PTFE. Después de la exposición, la ozonólisis catalizada por ácido de 4,4'-dipiridiletieno conduce a 4-dipiridiletieno. El gel de sílice asegura la presencia de agua, necesaria para completar la reacción de ozonólisis. En el

laboratorio, el 4-dipiridiletieno se condensa con 3-metil-2-benzotiazolinona hidrazina (MTBH) para producir la azida correspondiente, de color amarillo.

La absorbancia de la solución se mide a 430 nm. La producción de 4-piridilaldehído es una reacción específica de ozono; Ni los óxidos de nitrógeno ni los compuestos orgánicos, si están presentes, interfieren

- **CH₃COOH. Ácido acético:**

- Cuerpo difusivo amarillo código 120-2
- Cartucho adsorbente código 145

El código 145 es un cilindro de acero inoxidable, con una abertura de rejilla de la malla de 3x8 µm y un diámetro de 4,8 mm, envasado con 350 ± 10 mg de carbón de grafito (Carbógrafo 4), el tamaño de partícula es de 35-50 mesh (U.S. Standard Sieve) (apertura de malla). 30 mesh—> 0.595 mm/ 50 mesh—> 0.297 mm (<https://www.carbotecnia.info/encyclopedia/granulometria/>).

Los compuestos orgánicos volátiles son extraídos por adsorción y recuperados por desorción térmica, el análisis se realiza mediante cromatografía de gases capilar y detección de masas (MS).

- **HCHO. Formaldehído:**

- Cuerpo difusivo azul, código RAD1201
- Cartucho adsorbente código RAD165

El código RAD165 es un cartucho de acero inoxidable con 2,4-dinitrofenilhidrazina (2,4-DNPH) recubierto con Florisil®. Los aldehidos reaccionan con la 2,4-DNPH dando la correspondiente 2,4-

dinitrofenilhidrazona, las cuales son extraídas con acetonitrilo y analizadas por cromatografía líquida de alta resolución (HPLC) de fase reversa y detección UV.

Anexo II.

Muestreadores *Radiello*®.

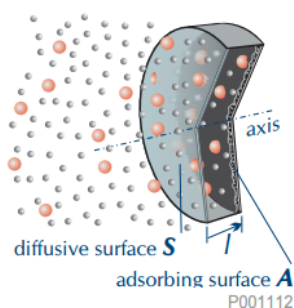
Anexo II. Muestreadores *Radiello*®:

A continuación se presentan las características y funcionamiento de los tubos de difusión pasiva de la marca *Radiello*®, los cuales se han usado para la realización de las mediciones en este estudio (información extraída del manual de *Radiello*®, SIGMA-ALDRICH 2006):

***RADIELLO*®**

La mayoría de los muestreadores pasivos/ difusivos son de pequeño tamaño y están llenos de absorbentes sólidos granulares, donde una o más secciones del dispositivo están en contacto con el aire. A diferencia de técnicas activas de muestreo, los muestreadores pasivos se sustentan en la difusión molecular sin asistencia del agente gaseoso para migrar desde el aire al material absorbente. Se desarrollaron por primera vez con forma "axial o planar", y como resultado, a menudo han sido caracterizados por tener muy baja capacidad y lento índice de muestreo (baja sensibilidad) comparado con técnicas de muestreo activo. Los resultados también pueden fluctuar dependiendo de las condiciones ambientales resultando en una sensibilidad y reproducibilidad generalmente pobres. A mediados de la década de 1990, el Dr. Vincenzo Cocheo, Director de la Fundación Salvatore Maugeri, Padua, Italia, en colaboración con el Centro Común de Investigación de la Comisión Europea y otras instituciones, desarrolló y patentó un revolucionario diseño de muestreo difusivo: la Simetría Radial ahora registrada bajo la marca *Radiello*®.

EL PRINCIPIO DE LA TECNOLOGÍA DE *RADIELLO*®

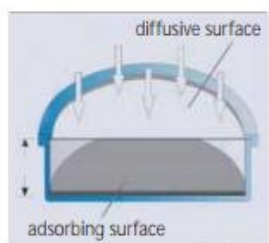


A partir de la ley de Fick, sabemos que la velocidad de muestreo (Q) es una función del coeficiente de difusión de un analito dado (D) y la constante geométrica de la muestra (K): $Q = D \cdot K$.

El coeficiente de difusión (D) siempre permanece constante para un determinado analito; Por lo tanto, para mejorar el índice de muestreo (Q), la constante geométrica (K) se debe mejorar: $K = S/l$, cuando S es la superficie de difusión y l es la distancia entre el superficie difusiva y absorbente.

La mayoría de muestreadores pasivos disponible en el mercado tienen forma plana o axial y ofrecen menores índices de muestreo y una capacidad de muestreo limitada. Como resultado, la sensibilidad puede resentirse durante el análisis a corto plazo (debido al bajo índice de muestreo), o durante muestreo a largo plazo (difusión de regreso del analito hasta perder capacidad). La tecnología Radiello ha solucionado esta cuestión mediante la mejora de la geometría con un diseño coaxial/radial patentado.

Índices de muestreo mejorados a través de la geometría estructural superior



Axial/Planar $Q < 10 \text{ mL/min}^*$



Radiello $Q = 80 \text{ mL/min}^*$

*Diffusion rates for benzenes at 25 °C

El sistema Radiello se compone de una superficie exterior cilíndrica que actúa como membrana de difusión en la que las moléculas gaseosas se mueven axialmente y en paralelo hacia el adsorbente (cartucho de recolección cilíndrico) y coaxial a la superficie difusiva. El diseño radial permite una superficie difusiva muy grande respecto a la superficie de adsorción mientras se mantiene una pequeña distancia de difusión entre las superficies difusora y absorbente. El muestreador tradicional axial y planar pasivo son planos y las superficies adsorbentes y difusivas son de igual tamaño resultando en una constante geométrica menor en comparación con los Productos Radiello. El diseño radial permite un incremento exponencial en el índice de absorción cuando se compara con

muestreadores pasivos tradicionales lo que se traduce en menores tiempos de muestreo.

Combinando la mejorada geometría con el grueso cuerpo difusor de polietileno microporoso del tubo, el sistema de muestreo *Radiello*® ofrece unos índices de muestreo muy altos y consistentes.

Radiello ofrece una alta capacidad

Con el muestreo activo, es decir, utilizando una bomba de presión, los compuestos gaseosos absorbidos se mueven a través del muestreador axial con un pico de campana Gauss. Cuando la concentración compuesto de analito del aire de escape alcanza 10% de la muestra de aire, indica la ruptura del analito. Posteriores muestreo darán lugar a pérdida de analito y la consecuente subestimación de la concentración ambiental. Con el muestreo pasivo/ difusivo, puede ocurrir un fenómeno similar llamado difusión de regreso. Esto sucede cuando la masa absorbida del compuesto supera la capacidad del adsorbente.

Tecnología Radiello se correlaciona bien con los métodos de bombeo (activo)
Una de las preguntas más comunes que tienen los analistas es si la tecnología *Radiello*® se correlaciona con los métodos activos existentes y validados. Se han realizado pruebas que lo demuestran: el estudio de comparación entre el muestreo activo y pasivo (*Radiello*®) mostró una excelente correlación entre los analitos probados.

Cómo utilizar las muestras de Radiello

El montaje del muestreador Radiello es simple. Los muestreadores que usan los monitores *Radiello*®, comienzan con un rápido montaje de la placa de soporte. Los cartuchos adsorbentes utilizados para recoger muestras son alojados en un tubo de vidrio sellado que se utiliza para almacenar el cartucho

antes y después del muestreo. Antes de la toma de muestras, el cartucho adsorbente tiene que ser transferido al cuerpo de difusión apropiado, que se enrosca sobre la placa de soporte triangular. El diseño del muestreador *Radiello*® permite transferir fácilmente los cartuchos adsorbentes al cuerpo difusivo sin tocar el propio adsorbente.



Análisis de Desorción

Actualmente hay alrededor de 10 tipos diferentes de cartuchos adsorbentes y 4 cuerpos difusivos diferentes para muestrear cientos de compuestos gaseosos diferentes bajo una gran variedad de condiciones. Por cada compuesto la Fundación Salvatore Mauregi ha desarrollado protocolos analíticos y de desorción diferentes, involucrando técnicas de análisis típicas de los laboratorios e industrias más independientes.

Características y beneficios de Radiello®

- El diseño Radiello ofrece altas tasas de absorción resultando en un muestreo más rápido.
- Una mayor capacidad adsorbente ofrece una mínima difusión inversa y mayor consistencia en el índice de absorción conduciendo a unos resultados más reproducibles.

- Un diseño más ajustado y una pared del difusor rígida conlleva a una mayor reproducibilidad del índice de absorción.
- Los índices de captación también son invariables a la velocidad del aire que permitiendo el muestreo en diversas condiciones.
- Todos los índices de captación son medidos con precisión (no calculado) en una cámara condiciones atmosféricas controladas bajo un amplio rango de condiciones incluyendo la concentración de analito, la temperatura, humedad relativa, velocidad del aire, con y sin los compuestos de interferencia, etc.
- El cuerpo difusivo impermeable hace a Radiello susceptible al mal tiempo.
- Todos los cartuchos adsorbentes se someten a un acondicionamiento complejo y un procedimiento de control calidad, resultando en un nivel de ruido de fondo de cartucho tres veces más bajos que el del instrumento.
- La combinación de bajos límites de detección, altos índices de captación y la alta capacidad, permite un tiempo de muestreo que oscila entre 15 min. a los 30 días (1 ppb-1000 ppm).

CARTUCHO ADSORBENTES Y ACCESORIOS CLAVE

Para llevar a cabo el muestreo de aire utilizando el sistema *Radiello*®, los requisitos mínimos son: el cartucho adsorbente, el cuerpo de difusión, y una placa de soporte para fijar el conjunto de cuerpo- cartucho difusivo. Además es necesario tener en cuenta la fecha y hora de exposición de los tubos.

Cartucho adsorbente

Existen varios cartuchos de adsorción diferentes, cada uno es específico para diferentes clases de compuestos. Las dimensiones de cada cartucho son 60 mm L x 4,8 o 5,8 mm de diámetro. Cada cartucho está diseñado para un solo uso, con la excepción de la desorción térmica (TD) del cartucho adsorbente.

Cada cartucho llega en un tubo de plástico envuelto en una bolsa de polietileno transparente sellada térmicamente (PE). La misma bolsa sellada se puede utilizar para guardar el cartucho después de realizar la medición, antes de la desorción y análisis.

Cuerpos difusivos

Los cuerpos de difusión están diseñados para albergar el cartucho adsorbente *Radiello*® durante el muestreo. Los cuerpos de difusión son enroscados en un extremo para facilitar su fijación a la base triangular. A diferencia de la mayor parte de los cartuchos adsorbentes, los cuerpos difusivos son reutilizables y se limpian con un detergente suave. Los cuerpos de difusión recogerán el polvo (especialmente durante la toma de muestras al aire libre), y el reemplazo se recomienda después de 4- 5 lavados. Las dimensiones son de 60 mm de diámetro x 16 mm de altura.



Hay 4 cuerpos difusivos diferentes disponibles. Cada uno tiene un diseño específico para la aplicación.



Anexo III.

**Prendas de la colección textil de la
Universidad Complutense de Madrid.**

Anexo III. Prendas de la colección textil de la Universidad Complutense de Madrid.

A continuación se exponen algunas de las piezas que comprende la colección textil perteneciente a la Universidad Complutense de Madrid y que se encontraba albergada en c arte c en la fecha en la que se realizó el muestreo de contaminantes atmosféricos. Se aportan las imágenes de estos ejemplos representativos a fin de que el lector pueda evocar una idea general de la colección (imágenes extraídas del catálogo de Colección Pedagógico Textil de la Universidad Complutense de Madrid: González Mena 1994).



Capita de cristianar. Indumentaria civil. S. XIX.



Chaleco. Indumentaria civil. Bordado erudito. S.XVIII



Manteleta o manité. Indumentaria civil. S.XIX- XX.



Camisola. Indumentaria civil. S.XVIII



Camisas de mujer. Popular. Austria. S.XVIII.



Calzoncillos noviales. Populares. Escuela Lagartera (Toledo). S.XVII



Gorro (cristianar). Escuela de Lagartera (Toledo). S.XVIII



Camisa de mujer. Popular. Escuela de Ávila. S.XVII.



Faldriquera. Popular. Escuela de Cáceres. S. XVIII



*Manilla. Encaje de Chantilly.
S.XVIII.*



*Cuello. Encaje de bolillos. Escuela de
Acebo (Cáceres). S. XIX.*



*Guarniciones de toalla (boda).
Encaje renacimiento. Escuela
Castellana (Palencia). S.XIX.*



*Pañito. Encaje de malla. Escuela
Valenciana. S.XVIII.*



*Toallas noviales o de cristianar.
Escuela de Cáceres. S. XVII.*



*Alfombra de oración. Escuela de
Granada. S.XV.*



*Dechado. Escuela Castellana
(Toledo). S. XVIII.*

